

УДК 631.459.2

СПЕЦИФИКА РАЗВИТИЯ СМЫВА ПОЧВ ПРИ ВЕСЕННЕМ СНЕГОТАЯНИИ НА ПАШНЕ СЕВЕРНОЙ ЗОНЫ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

© 2024 г. И.А. Голубев^{a,*}, О.И. Иванова^{b,**}

^aФилиал ПАО «Россети Сибирь» — «Красноярскэнерго», Красноярск, Россия

^bКрасноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: igorgol1984@bk.ru

**E-mail: ivolga49@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.

После доработки 08.12.2023 г.

Принята к публикации 24.05.2024 г.

Представлены результаты исследований смыва и аккумуляции почв в период 2009–2017 гг. в северной части Красноярской лесостепи на участках с высокой интенсивностью эрозионно-аккумулятивных процессов. Установлен широкий диапазон значений эрозий от талых вод — от 0.4 до 25 мм за весенний период. Приведены результаты применения уточненной Региональной модели расчета потенциального смыва для северной части Красноярской лесостепи. Произведен анализ метеорологических факторов и условий подстилающей поверхности, влияющих на распределение величин талого стока, смыва и аккумуляции почв на пахотных массивах, расположенных на наклонных водораздельных поверхностях: специфика распределения потоков талых вод определяет формирование зон экстремальной эрозии по периметру массивов пашни в нижних частях склона — до 15–20 мм слоя почвы. В условиях невысоких значений крутизны склонов, влияние рельефа на эрозию в значительной степени определяется высокими длинами склонов и линий тока талых вод. Распределение величин смыва по площади пашни показывает тесную корреляцию со значениями снегонакопления и влажности почв. Установлены пространственно-временные закономерности влияния предшествующего осеннего увлажнения почв на интенсивность эрозии: величины смыва возрастают с увеличением влажности почв, средние значения эрозии коррелируют с величинами осеннего увлажнения почв в динамике по годам полевых наблюдений. Предложены специальные почвозащитные мероприятия для участков с наиболее интенсивным смывом в районе исследований.

Ключевые слова: смыв, склоны, талые воды, поверхностный сток, снегонакопление, интенсивность снеготаяния, осеннее увлажнение

DOI: 10.31857/S0869607124010033, **EDN:** OCRHPF

ВВЕДЕНИЕ

Важность изучения антропогенной водной эрозии почв на обрабатываемых склонах водосборов рек обуславливается значительным ущербом, причиняемым данными процессами ценному гумусовому горизонту почвенного покрова. Вследствие этого, верхний плодородный слой почв истончается, снижается содержание гумуса, вымываются микроэлементы, важные для роста и развития растений. Особого внимания и применения неотложных противоэрозионных мероприятий потребу-

ют пахотные массивы, на которых вследствие одновременного воздействия множества различных факторов величины смыва достигают катастрофических величин.

На территории Средней Сибири исследований эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах водосборов в лесостепной зоне выполнено мало. В советский период основное внимание уделялось овражной эрозии, исследование микроручейкового смыва выполнялись эпизодически, их результаты во многом утеряны. Следует отметить работы, выполненные Институтом географии СО РАН в Назаровской и Минусинской котловинах [1, 18].

На пашне лесостепной зоны Средней Сибири большое значение имеет поверхностный сток талых вод, в период снеготаяния, оказывающий большое влияние на формирование и развитие эрозионно-аккумулятивных процессов одновременно на больших площадях обрабатываемых земель. В 2009–2017 гг. проведены исследования величин смыва и аккумуляции почв от талых вод в северной части Красноярской лесостепи на опытном участке Долгий Лог.

Целью настоящей работы является исследование пространственно-временных закономерностей развития эрозионно-аккумулятивных процессов, вызываемых талыми водами, на пахотных участках с наибольшей интенсивностью процессов смыва почв (массивы пашни, расположенные на наклонных водораздельных поверхностях). Задачами работы являются: изучение особенностей распределения потоков талых вод и его воздействия на интенсивность смыва; анализ и обобщение гидрометеорологических факторов смыва и условий подстилающей поверхности; анализ динамики величин эрозии по годам наблюдений.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Объект (характеристика участка работ)

Участок Долгий Лог располагается в 70 км севернее г. Красноярска вблизи д. Ковригино. Он представляет собой массив пашни площадью 520 га, средней абсолютной высотой 230 м. Как и многие пахотные массивы в северной части Красноярской лесостепи, рассматриваемый участок по всему периметру окружен лесом. В направлении с запада на восток участок делится грунтовой дорогой на два массива – северный (170 га) и южный (350 га) [4, 7]. По своим природно-климатическим условиям, является типичным для северной зоны Красноярской лесостепи.

В пределах опытного участка наиболее значимым для изучения эрозионно-аккумулятивных процессов является северный массив участка Долгий Лог, так как специфика талого стока здесь определяет интенсивную эрозию и большие величины смыва почв. Исходя из этого, мы уделили основное внимание данной территории.

Северный массив (рис. 1) занимает наклонную водораздельную поверхность протяженностью около 3000 м. Водораздельная вершина (высота 274.0) располагается на его западной окраине. Общий наклон массива следует вдоль его водораздельной линии, по направлению от вышеуказанной вершины с запада на восток. Водораздельная линия делит массив на два обширных склона – северо-восточной (склон *I*) и юго-восточной (склон *II*) экспозиций. В южной части северного массива, вдоль грунтовой дороги проходит искусственная водоотводящая канава шириной 80–120 см и глубиной 0.5–1 м.

Склон *I*, выпуклой формы, северо-восточной экспозиции, имеет среднюю длину 400 м, ширину 3150 м. Склон *II*, выпуклой формы, юго-восточной экспозиции, имеет среднюю длину 300 м, ширину 3140 м. Оба склона смежные и имеют общую вершину, представляя собой северную и южную части наклонной водораздельной поверхности.

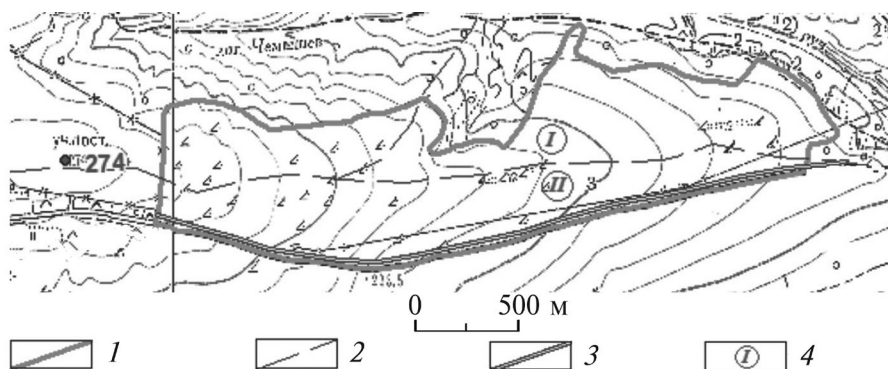


Рис. 1. Схема северного массива участка Долгий Лог. 1 – граница северного массива; 2 – водораздельная линия; 3 – придорожная канава; 4 – номер склона.

Fig. 1. The scheme of the Northern array of the Dolgiy Log area. 1 – border of the northern mass; 2 – dividing line; 3 – roadside ditch; 4 – slope number.

Рельеф северного массива характеризуется наличием сети ложбин стока шириной 50–100 м и длиной до 200 м в приопушечных зонах, преимущественно в северной части. На остальной территории рельеф пологий, склоны в основном прямые и слабовыпуклые, средняя крутизна 2° [7].

Агрофон в период исследований характеризовался следующим состоянием: в 2009 г. – стерня, в 2010-м – стерня в западной части массива и озимые в восточной, в 2011-м – залежь и озимые, в 2012–2017 гг. – стерня.

Распашка во все годы наблюдений производилась преимущественно вдоль склона. В период снеготаяния отмечено стекание талых вод по бороздам от водораздельной вершины вниз по склону. Работа талых вод приводит к образованию струйчатых размывов, характерных для продольной обработки почв (рис. 2).



Рис. 2. Струйчатые размывы при вспашке вдоль склона. Северный массив участка Долгий Лог, апрель 2011 г.

Fig. 2. Trickle washouts when plowing along the slope. Northern array of the Dolgiy Log area, april 2011.

В период снеготаяния потоки талых вод начинают движение в направлении от высоты 274.0 с запада на восток. Далее в процессе движения в соответствии с условиями рельефа часть стока распределяется вниз по склону *I* в северо-восточном направлении, и по склону *II* – в юго-восточном (рис. 3). Остальная часть водных потоков достигает нижней части склона на востоке северного массива, где происходит отложение основной массы продуктов смыва в приопушечной части и далее в лесном массиве (рис. 4).

Среди почв на участке преобладают темно-серые лесные и черноземы выщелоченные среднегумусные. Приведем их краткую характеристику.

Темно-серые лесные имеют эталонную мощность верхнего гумусового горизонта до 55 см. Содержание физической глины в пахотном слое составляет 48.5% при

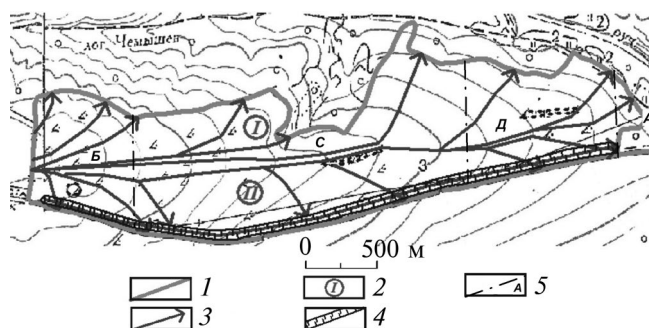


Рис. 3. Схема направления линий тока талых вод. 1 – граница массивов участка; 2 – номер склона; 3 – направление линий тока; 4 – придорожная канава; 5 – границы и буквенное обозначение зон смыва (по А.Д. Орлову [15]).

Fig. 3. The scheme of the direction of meltwater flow lines. 1 – the boundary of the massifs of the site; 2 – the slope number; 3 – the direction of the flow lines; 4 – a roadside ditch; 5 – boundaries and letter designation of flushing zones (according to A.D. Orlov [15]).



Рис. 4. Аккумулятивные наносы в приопушечной зоне склонов I и II, май 2010 г.

Fig. 4. Accumulated sediments in the edge of forest zone of the slopes I and II, May 2010.

тяжелосуглинистом гранулометрическом составе и 61–64% при глинистом. Среди фракций преобладают крупнопылеватая и илистая. Содержание гумуса в верхнем горизонте 4.6–5.7%, pH почвенного раствора 6.6–7.0.

Среди черноземов выщелоченных среднегумусных присутствуют среднемощные (эталонная толщина верхнего горизонта до 49 см) и маломощные (до 32 см). Содержание физической глины 51.3–65.5% (глинистые) и 44.9–47.3% (тяжелосуглинистые). Содержание гумуса в верхнем горизонте составляет 6.3–6.6%, pH почвенного раствора 6.5–7.2.

Коренные породы исследуемой территории сложены отложениями девона, юрского и мелового периода; широко распространены четвертичные отложения, которые являются основными почвообразующими породами и состоят из аллювиальных, элювиальных и делювиальных образований.

Методы

Приведем описание основных методов измерений и расчетов, примененных в процессе исследований.

Модернизированный метод шпилек. Установка шпилек производилась в конце февраля группами по 2–4 шт. максимально точно в направлении падения склона на всех его элементах от водораздельной линии до края пашни. Всего на северном массиве было сформировано 15 групп, общая численность установленных шпилек — от 30 до 50 шт. Модернизация метода заключалась в добавлении дополнительной шпильки с пластиной, защищающей почву от смыва и позволяющей определить величину гидротермических движений почвенного покрова в весенний период, чтобы исключить ее из показаний соседних в группе шпилек [7]. Шпильки внедрялись в почву на глубину 17–20 см таким образом, чтобы заранее нанесенная метка (надпил на шпильке) была точно на уровне почвенной поверхности. После завершения снеготаяния производились измерения величин смыва (аккумуляции) посредством замеров от метки до поверхности грунта вниз (при смыве) или вверх (при аккумуляции).

Метод обмера водороин. Для применения данного метода выявлялись участки-микроводосборы на территории пашни с видимыми границами (водораздельными линиями). Производилась крупномасштабная топографическая съемка для точного определения их площади. В процессе работ, после завершения снеготаяния измерялся объем каждого видимого ручейка и водороины в пределах участка. Смыв определялся делением их суммарного объема на площадь микроводосбора [7].

Измерения мутности. Одновременно с измерениями смыва, делались заборы проб воды из ручейковой сети в пластиковые бутылки на пашне на всех элементах склонов. При камеральных работах определялся точный объем взятых проб с помощью мерного цилиндра, производилась их фильтрация через бумажные фильтры. Фильтры с почвенными частицами после просушки взвешивались с точностью до 0.01 г. От полученной величины отнимался вес самого фильтра для определения веса почвенных частиц. Мутность определяется отношением полученного веса почвенных частиц в пробе к объему взятой пробы воды.

Измерения скоростей водных потоков. Производились поплавковым способом. Выявлялись относительно прямые участки русла ручья, определялась их длина. В процессе измерений скорости определялось время, за которое поплавок преодолел расстояние на выделенном участке ручья. Наблюдения проводились с 3-х или 5-кратной повторностью, за истинное значение скорости принималась средняя величина между результатами замеров. Скорости потоков измерялись на всех элементах исследуемых склонов.

Региональная методика расчета потенциального смыва почв Д.А. Буракова. Подробное описание уточненного варианта данной модели приведено в [6]. Она основана на Универсальном уравнении смыва и формуле Указаний с использованием региональных особенностей и рекомендаций по определению смываемости почв. Формула Д.А. Буракова имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}_m = 4 \cdot K_m \cdot \Pi \cdot \Pi_0 \cdot P \cdot F \cdot K, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_m$ — потенциальный смыв от талых вод, т/га в год; K_m — эрозионный потенциал талых вод; Π — величина смываемости для стандартной почвы (чернозем выщелоченный, развитый на лессовидных суглинках и лессах, сильно эродированный), Π_0 — коэффициент относительной смываемости почв (зависит от механического состава, типа почв и степени их смытости), P — эрозионный потенциал рельефа; F — коэффициент формы склона, K — поправочный множитель, суммарно учитывающий влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и величину поступления воды из толщи снега в весенний период. Данная модель была апробирована на пахотных участках центральной части Красноярской лесостепи и уточнена путем добавления в модель корректирующего множителя, суммарно учитывающего величину предшествующего осеннего увлажнения почв и интенсивности поступления воды на поверхность почвенного покрова в период снеготаяния [3, 6, 7]. Отметим, что Региональная модель позволяет рассчитать только потенциальный смыв почв, аккумуляция данная формула не определяет.

В связи с тем, что на многих выбранных для полевых измерений микроводосборах и профилях склонов обработка почв производилась вдоль склона, для применения расчетной модели были выбраны профили склона № 1 и 2 с группами шпилек № 1, 2, 3а, 3б, 3в (рис. 5), расположенные в западной (приводораздельной) части северного массива [5, 7]. На данных профилях склонов отсутствовали нарушения условий агротехники.

Расчет снеготаяния. Запасы воды в снеге определялись на основании данных по плотности и высоте снежного покрова. В период максимального снегонакопления (первая декада марта) весовым снегомером на участке Долгий Лог проводились снегомерные съемки. С интервалом в 10 м измерялась высота снега, через каждые 100 м — его плотность. В дальнейшем с помощью линейной регрессии устанавливалась связь высоты и плотности снежного покрова, рассчитывались плотность и запас воды в снеге через 10 м хода. Это позволило рассчитать снеготаяния на каждом десятиметровом участке.

Расчет снеготаяния. Для оценки интенсивности таяния снега на территории Красноярской лесостепи определялась величина слоя растаявшего снега. Данная величина рассчитывалась для участков равномерного залегания снежного покрова на местности произведением суммы положительных температур воздуха (по данным ближайшей метеостанции Сухобузимское) на коэффициент стаивания для каждого года полевых наблюдений по формуле:

$$h_c = k_c \cdot \sum(+t^\circ), \quad (2)$$

где h — слой образовавшейся талой воды, мм; k_c — коэффициент стаивания (5 мм/сут. для лесостепной зоны).

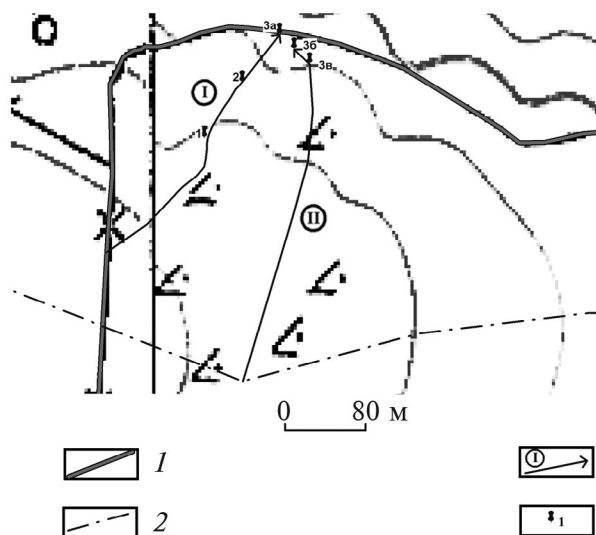


Рис. 5. Схема расположения групп шпилек в западной части северного массива участка Долгий Лог. 1 – граница массивов участка; 2 – водораздельная линия; 3 – направление линий тока и их номера; 4 – группы шпилек и их номера.

Fig. 5. Diagram of the location of groups of studs in the western part of the Northern array of the Dolgiy Log area. 1 – the boundary of the arrays of the site; 2 – the dividing line; 3 – the direction of the current lines and their numbers; 4 – groups of studs and their numbers.

Водоотдача снега на почву при допущении одинаковой влагоемкости снежного покрова и равномерного таяния снега определяется следующим образом:

$$m = \frac{h_c}{1 - z_0}, \quad (3)$$

где m – водоотдача, мм; h_c – интенсивность снеготаяния, мм/сут.; z_0 – относительный сход снега, при котором начинается отдача воды. Для расчетов принималось среднее значение $z_0 = 0.13$; величина h_c определялась по формуле 2 [7, 9, 13, 14, 16].

Расчет предшествующего осеннего увлажнения почв. Для территории Красноярской лесостепи рассчитан показатель предшествующего осеннего увлажнения почв за период 2009–2017 гг. Методика расчета используемого показателя для целей гидрологических прогнозов рассмотрена в [2, 17, 19]. Расчет производился по сумме суточных значений осадков в октябре – ноябре (до даты окончательного перехода температуры воздуха через 0°). Часть осадков в ноябре выпадает в виде снега, который тает при потеплениях. Слой растаявшего снега определялся по значению средней суточной положительной температуры воздуха и коэффициенту стаивания по формуле 2 и суммировался с количеством выпавших жидких осадков [7]. Осадки в сентябре не учитывались в связи с тем, что они, как правило, успевают просочиться вглубь почвенного покрова.

Территориальное обобщение [7] данных полевых исследований смыва выполнено путем интерполяции характеристик смыва на неизученные участки, находящиеся в сходных условиях, с учетом уклона, длины, экспозиции, местоположения и формы склонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что общее увеличение интенсивности смыва происходит вследствие значительной протяженности склонов, повышения удельных расходов воды, скорости и, соответственно, эродирующей способности потока талых вод по мере его движения в восточном направлении от высшей точки (высота 274.0) к низшей [7]. В распределении величин смыва по северному массиву участка Долгий Лог можно обнаружить следующие тенденции.

Общее увеличение интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах *I* и *II* с запада на восток, т. е. в направлении основного тока талых вод.

Увеличение смыва в направлении от водораздельной линии к нижней части склона; на склоне *I* — к лесному массиву, на склоне *II* — к искусственной придорожной канаве (рис. 3). Высокое значение в центре массива, в придорожной части связано с наличием нескольких ложбин, что приводит к большей концентрации талого стока.

Исследованиями, выполненными А.Д. Орловым [15] в Новосибирском Приобье (1962–1963 гг.), была выявлена роль и влияние выпуклой формы склонов южных, западных и восточных экспозиций в усилении интенсивности эрозии, в зависимости от характера проявления эрозионных процессов и влияния различных факторов.

Северный массив участка Долгий Лог в значительной мере соответствует характеристикам, приведенным А.Д. Орловым (рис. 3). В продольном разрезе (вдоль водораздельной линии) он представляет собой выпуклый склон длиной 3000 м и крутизной 1–3°. Длины линий тока талых вод составляли от 400 до 3000 м.

В соответствии с делением склона, предложенным А.Д. Орловым, распределение величин смыва по зонам исследуемого участка следующее. В зоне Д, характеризующейся максимальной интенсивностью эрозионных процессов, смыв составляет 18–25 мм; в зоне Б (водораздельная часть) — 0.4–3.0 мм; в зоне С (верхняя и средняя часть наклонной водораздельной поверхности) средний смыв — 8.2 мм. Зона А (частичная аккумуляция) располагается на территории, занятой лесной растительностью, мощность отложений в годы исследований превышали 30 см (средние значения смыва по участку Долгий Лог взяты за 2011 год — со средними за период наблюдений показателями).

Приведем результаты измерений скорости и мутности потоков талых вод. Измерения показали, что в условиях стерни, в привершинной части склонов №№ 1 и 2 скорости водных потоков в период максимального снеготаяния (15 00–17 00 ч.) составляют 0.15–0.35 м/с, мутность — 0.4–0.6 г/л; в средней части склонов скорости увеличиваются до 0.5 м/с, мутность — до 1.5 г/л. В нижних частях склонов эти показатели достигают максимальных значений: скорость до 0.7–1.2 м/с, мутность — 17.5 г/л; эрозионный потенциал талого стока здесь наиболее высокий [7]. Значительную роль играет формирование сугробов. Это во многом способствует развитию в нижней части склонов наибольших на опытном участке величин смыва — до 18–25 мм.

Обнаружено отложение продуктов смыва в местах перегиба продольного профиля, в результате разгрузки потоков талых вод. Слой наносов в этих зонах формируются в период с третьей декады апреля по первую декаду мая, его толщина составляет 1.5–4 мм.

Следует отметить, что величины допустимых не размывающих скоростей (ДНС) по данным разных исследователей [11], для супесей и легкосуглинистых почв составляет 0.65–0.7 м/с.

Результат территориального обобщения полевых исследований смыва и аккумуляции почв в виде карты зонирования смыва по средним за период исследова-

ний величинам представлен на рис. 6. Установка групп шпилек с максимальным охватом площади всего изучаемого массива опытного участка и сопутствующие замеры водороев на микроводосборах пашни позволяют произвести экстраполяцию на неисследованные зоны внутри участка, с приведением к общим единицам измерения смыва ($10 \text{ м}^3/\text{га}$ в среднем эквивалентен 1 мм слоя почвы). Отметим, что приведенная карта носит условно-обобщенный характер и отражает только основные закономерности распределения величин смыва по площади северного массива исследуемого участка.

Визуальные наблюдения и периодические замеры толщины гумусового горизонта почв в разных частях опытного участка в последние годы полевых наблюдений выявили существенное уменьшение мощности гумусового горизонта по сравнению с эталонными значениями. Измеренные значения толщины верхнего горизонта почв составили от 7 до 23 см. В нижней части склона II вдоль придорожной канавы зафиксирован полный смыв горизонта A и развитие эрозионных процессов на горизонте B.

Одновременно с выполнением полевых измерений смыва и аккумуляции почв, для северного массива участка Долгий Лог выполнен расчет потенциального смыва почв от талых вод с помощью Региональной методики, разработанной Д.А. Бураковым для обрабатываемых земель Красноярского края (лесостепная зона Средней Сибири). Агрофон западной (приводораздельной) части северного массива, для которой производился расчет, представлен в 2009 и 2010 гг. стерней, в 2011 г. — залежью; направление обработки почв — поперек склона. Результаты представлены в (табл. 1). Видно, что на данном участке расчетные величины эрозии при применении уточненной методики составляют от 0.6 мм до 1.7 мм. Уточненная модель показывает результаты, в целом приближенные к реальным значениям смыва для участков пашни, занятых залежью и с отсутствием нарушений правил агротехники. Следует отметить, что наибольшее расхождение расчетных и измеренных величин смыва отмечено в приопушечных зонах в восточной части северного массива, при обработке вдоль склона. Измеренные величины смыва в таких условиях достигают экстремальных величин [5, 7], что определяет разницу с вычисленными значениями в 7–10 раз и более.

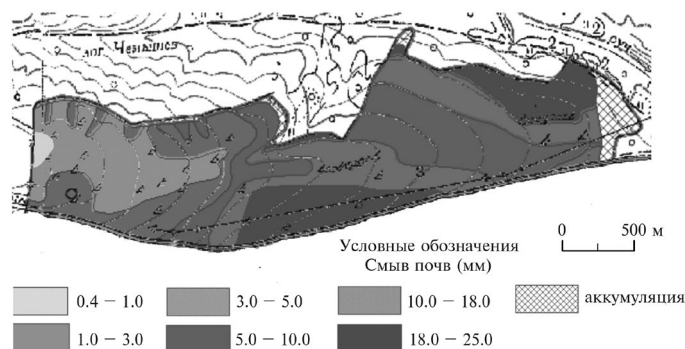


Рис. 6. Пространственное расположение зон с разной интенсивностью смыва почв от талых вод, уч. Долгий Лог, северный массив (усредненные данные за 2009–2017 гг.).

Fig. 6. Spatial location of zones with different intensity of soil flushing from meltwater, the Dolgiy Log area, Northern array (averaged data for 2009–2017).

Таблица 1. Репрезентативные данные по смыву в западной части северного массива уч. Долгий Лог.
Table 1. Representative data on flushing in the western part of the northern massif of the Long Log.

Номер точек со шпильками	Характеристики склона					2010 г.		2011 г.		
	Направление	Уклон, %	Длина, м	Элемент	Экспозиция	Смыв (–) / аккумуляция (+), мм слоя почвы		Смыв (–) / аккумуляция (+), мм слоя почвы		
						Измеренный	Вычисленный (Эр) до уточ.	Вычисленный (Эр) уточ.	Измеренный	Вычисленный (Эр) до уточ.
1	до 1*	3.1	157	верхняя часть	СВ	–2.4	–0.3	–0.6	–2.5	–0.1
2	1–2	4.6	76	средняя часть		–3.2	–0.7	–1.7		–0.4
3а	2–3а	4.7	69	нижняя часть		+14.5	–0.7	–1.6	–0.3	–1.1
3в	до 3в	2.4	352	средняя часть	СВ	–1.1	–0.3	–0.8	–3.3	–0.2
3б	3в–3б	7.2	25	средняя часть		–1.2	–0.5	–1.1		–0.7

Приведем характеристику основных гидрометеорологических факторов, оказывающих влияние на интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов и пространственное распределение величин смыва и аккумуляции.

Интенсивность снеготаяния. Расчет характеристик таяния снега и водоотдачи показали, что максимальная суточная величина поступления воды на поверхность грунта в 2009 г. существенно выше, чем в другие годы наблюдений (42.9 мм/сут), что могло существенно увеличить величину стока и смыва почв. Минимальное значение данной величины за период наблюдений отмечено в 2010 г (25.6 мм/сут) и до 2017 г. изменялась внутри этого диапазона.

Предшествующее осеннее увлажнение почв. Величина осеннего увлажнения почв характеризуется количеством воды, содержащейся в почвенном покрове в период, предшествующий установлению стабильных отрицательных температур воздуха (октябрь–ноябрь). Гидрометеорологические условия в осенний период оказывают воздействие на характеристики стока и величины смыва почв в последующую весну. Оно заключается в насыщении верхнего слоя почвы водой и, соответственно, формировании водонепроницаемости почв. Это влияет на потери талого стока на впитывание и, соответственно, увеличение или уменьшение интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов в последующий весенний период [7, 10, 13, 23].

Исследованиями, выполненными А.А. Танасиенко для Западной Сибири [20, 21] установлено, что при влажности почв более 20% все мерзлые грунты становятся почти водонепроницаемыми независимо от их гранулометрического состава. Из этого можно заключить, что степень водонепроницаемости мерзлых грунтов определяется степенью их насыщения водой перед наступлением стабильных отрицательных температур воздуха [2, 13, 21, 24]. Согласно исследованиям В.Д. Комарова [13, 14], при фиксированной влажности потери стока уменьшаются с ростом глубины промерзания почвы. Эта зависимость прослеживается до глубины промерзания 60 см. В суровых условиях сибирских зим, глубина промерзания почти ежегодно превышает 60 см и является некоторым «постоянным фоном». Следовательно, изменчивость потерь стока в Сибири определяется преимущественно варьированием осеннего увлажнения бассейнов [2, 7, 9, 13].

В годы наиболее объемных полевых наблюдений (2009–2011 гг.) расчетный показатель осеннего увлажнения находился в диапазоне от 28.9 до 57.6 мм. В 2017 г. его величина была минимальной за период наблюдений и составила 21 мм. Выполненное сопоставление измеренных величин смыва от талых вод с показателем осеннего увлажнения и с величиной модуля осеннего стока r . Бузим подтвердило их корреляцию (см. табл. 2).

Формирование сугробов. Северный массив участка Долгий Лог имеет окаймление лесом в западной, северной и восточной частях своих границ. Совместно с воздействием господствующих юго-западных и западных ветров, это вызывает образование сугробов в приопушечных зонах в восточной и северо-восточной частях массива – высота снега достигает 100–120 см, величина снегозапаса – 275–309 мм (рис. 7). Таяние снежного покрова на участках высокого снегонакопления затягивается, и в заключительной фазе может происходить при высокой температуре и интенсивности снеготаяния. В этих условиях величины смыва выше на северных и северо-восточных склонах с наибольшим снегонакоплением и более поздним сходом снега (рис. 6, 8). Этому способствует протаивание и прорывы снежных перемычек, преграждавших путь скоплениям воды, временно задержанной в лужах под снегом [7].

Таблица 2. Метеорологические факторы и смыв почв, северный массив участка Долгий Лог.
Table 2. Meteorological factors and soil washout, northern massif of the Dolgiy Log area.

Год	Дата измерения эрозии	Максимальное суточное поступление воды на поверхность почвы, мм	Средний запас воды в снеге и осадки (S + X), мм	Слой поверхностного стока весеннего половодья р. Бузим – с. Малиновка (Y), мм	Предшествующее осеннее увлажнение		Средний смыв, мм
					Расчетный показатель, мм	Модуль стока М, р. Бузим – с. Малиновка (октябрь + ноябрь, за предшествующий год), л/с × км ²	
2009	26 апр.	42.9	123.4	37.5	57.6	1.9	15.5
2010	10 май	30.0	154.9	64.1	28.9	1.2	4
2011	29 апр.	25.7	105.3	32.1	41.8	1.7	10.6
2013	20 апр.	40.0	87.6	43.6	38.9	1.6	5.4
2017	15 апр.	31.9	70.0	16.9	21	0.7	3.0

Сопоставление величин смыва почв и снегозапасов на северном массиве участка Долгий Лог показывает, что зонам с наибольшим снегонакоплением, расположенным в северной и северо-восточной частях северного массива (240–309 мм), как правило, соответствуют наибольшие величины смыва — от 10 до 25 мм (рис. 6, рис. 7). Соответственно, в зонах с меньшим снегозапасом (70–140 мм) в западной и юго-западной частях опытного участка зафиксированы минимальные величины смыва — от 0.4 до 5 мм. Таким образом, прослеживается корреляция величин смыва и снегозапаса по площади опытного участка, что подтверждает влияние накопления и распределения снежного покрова на интенсивность процессов эрозии.

Одновременное влияние нескольких факторов в восточной части опытного участка на интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов, таких как поздневесенние сугробы, продольная обработка почвы, а также высокие скорости водных потоков, образующиеся вследствие возрастания удельных расходов воды, обуславливают в данной зоне наибольшие величины смыва за весь период наблюдений [7, 8, 18, 22].

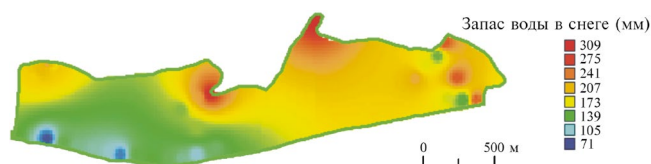


Рис. 7. Распределение величин снегонакопления на северном массиве участка Долгий Лог (усредненные данные за 2009–2017 гг.).

Fig. 7. Distribution of snow accumulation values in the Northern array of the Dolgiy Log area (averaged data for 2009–2017).



Рис. 8. Поздневесенний сугроб и аккумуляция продуктов смыва в восточной части северного массива уч. Долгий Лог, апрель 2017 г.

Fig. 8. Late-spring snowdrift and accumulation of flushing products in the eastern part of the Northern array of the Dolgiy Log area, April 2017.

Исходя из вышесказанного, выделим отличительные особенности пахотных массивов на наклонных водораздельных поверхностях в северной части Красноярской лесостепи, ежегодно влияющие на распределение потоков талых вод и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов на примере северного массива участка Долгий Лог [7].

1. *Геометрия северного массива.* Как было указано выше, северный массив участка представляет собой наклонную водораздельную поверхность. Присутствуют два смежных широких склона *I* и *II*, имеющие общее понижение в восточном направлении. Вследствие этого, в процессе стекания основного потока талых вод происходит его разделение (рис. 3), при этом максимальные значения скоростей водных потоков, смыва и аккумуляции наблюдались в восточной и северо-восточной частях северного массива.

2. *Длины склонов.* На участке Долгий Лог преобладают склоны со значительной протяженностью – от 500 до 2500 м. Поскольку средний уклон на опытном участке небольшой (2.5°), высокие значения смыва могут возникать вследствие влияния длинных склонов, в результате возрастания удельных расходов воды и скоростей течения.

3. *Формирование сугробов.* Окаймление лесом по периметру границ участка совместно с воздействием преобладающих ветров вызывает образование сугробов в приопушечных зонах. Таяние снежного покрова на участках высокого снегонакопления затягивается, и в заключительной фазе может происходить при высокой температуре и, соответственно, большой интенсивности снеготаяния. В этих условиях величины смыва выше на северных склонах с наибольшим снегонакоплением и более поздним сходом снега.

4. *Обработка почвы вдоль склона.* Данный фактор наблюдался ежегодно в период наблюдений. Наблюдения многих авторов [8, 12, 18] показывают, что вспашка вдоль склона многократно усиливает интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов. Отметим, что общее направление борозд совпадает с направлением движения потока талых вод в восточном направлении от высоты 274.0.

5. *Распределение величин влажности почв.* Исследования влажности почв на участке Долгий Лог перед снеготаянием показали, что содержание влаги в почве увеличивается вниз по склону. Например, влажность почв перед снеготаянием в 2011 году в западной части массива составила в среднем 30.5%, в то время как в восточной (нижняя часть водораздельного плато) – 50.1%. Данный фактор уменьшает впитывание талых вод и, соответственно, увеличивает интенсивность эрозии.

Рекогносцировка района исследований и изучение картографических материалов показывают, что в северной части Красноярской лесостепи доля эрозионно-опасных пахотных массивов, аналогичным по своим характеристикам северному массиву участка Долгий Лог, составляет 30–35% от общей площади пашни. Общая площадь Красноярской лесостепи составляет 777 000 га, из них площадь северной части – примерно 350 000, степень распаханности территории составляет примерно 21% [7]. Следовательно, общая площадь пашни в северной части составляет 73 500 га, 22 000 га из которых относятся к числу эрозионно-опасных или подвержены сильному смыву. Смытые частицы в большом количестве выносятся за пределы пахотных земель, основная их масса откладывается в прилегающих лесных массивах и приопушечных зонах (рис. 4, 6, 8), а также на днищах балок, суходолов и оврагов. В зависимости от водности рассматриваемых лет, примерно 0.5–2% от их количества достигает эрозионно-русловой сети [7].

На вышеуказанных участках пахотных массивов северной части Красноярской лесостепи вследствие интенсивной эрозии происходит уменьшение мощности гумусового горизонта, изменение его свойств, снижение плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур. Таким образом, часть пахотных земель на исследуемой территории требует проведения специальных почвозащитных мероприятий. В связи с этим, уместно привести следующие рекомендации по защите почв от водной эрозии на этих землях:

- повсеместная вспашка поперек склона с почвоуглублением;
- чизелевание до 40 см вглубь почвы с сохранением стерни;
- применение шелевания на наиболее крутых склонах ($5-7^\circ$ и более);
- создание стерневых кулис поперек склона при уборке зерновых культур;

На участках пашни с максимальными значениями смыва и наиболее эродированными почвами (на примере участка Долгий Лог – восточная часть северного массива) следует производить залужение многолетними травами до 5 лет (люцерна, костер, тимopheевка и т. д.), с подсевом на 4-й или 5-й год, внесение минеральных удобрений. В зонах концентрации стока с начальными этапами процессов оврагообразования – производить засыпку. Кроме того, целесообразно рассмотреть вопрос о трансформации угодий – переводе в сенокос или пастбище.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Интенсивность эрозии на различных элементах исследуемых пахотных массивов изменяется от «слабой» до «катастрофической» по классификации [22], измеренные значения смыва изменяются от 0.4 до 25 мм.

Развитие эрозионно-аккумулятивных процессов под воздействием талых вод на массивах пашни, расположенных на наклонных водораздельных поверхностях, определяется комплексом гидрометеорологических факторов и условий подстилающей поверхности. Наибольшие величины снеготалой эрозии отмечены в низинах пахотных массивов на склонах, северной, восточной и северо-восточной экспозиций, которые характеризуются максимальным накоплением снега и неравномерностью его залегания, формированием поздневесенних сугробов, высокой влажностью почв и наибольшими скоростями водных потоков. Суммарно это приводит к экстремально высоким значениям смыва (до 20–25 мм).

Специфика распределения талого стока по пахотным массивам, расположенным на наклонных водораздельных поверхностях, объясняет формирование зон интенсивной эрозии в нижней части склонов по периметру данных участков (до 15–20 мм), а также значительные величины аккумуляции наносов (25–35 см) в прилегающих лесных массивах.

В условиях невысоких значений крутизны склонов (в среднем $2.5-3^\circ$), влияние рельефа на эрозию в значительной степени определяется высокими длинами склонов и линий тока талых вод (от 400 м и выше). Возрастание величин смыва происходит вследствие увеличения удельных расходов воды.

Установлено заметное влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и дружности снеготаяния на интенсивность снеготалой эрозии как в пространственном, так и во временном аспектах – при его низком значении увеличиваются потери стока на впитывание, эрозионный потенциал талых вод снижается. С одной стороны, с увеличением влажности почв интенсивность смыва возрастает вниз по склону с выносом продуктов смыва за пределы пахотных угодий и их аккумуляцией в приле-

гающих нераспаханных низинах склонов, приопушечных зонах и лесных участках, с другой — присутствует значительная корреляция средних значений эрозии и величин осеннего увлажнения почв в динамике по годам наблюдений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают большую благодарность и признательность заведующему НИЛ Эрозии почв и русловых процессов Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д-ру геогр. наук С.Р. Чалову; д-ру с.-х. наук Ю.Ф. Едимоичеву; канд. геогр. наук А.В. Кожуховскому за рекомендации и обсуждение.

Статья посвящается памяти выдающегося ученого-гидролога, д-ра геогр. наук, профессора Д.А. Буракова (1939–2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баженова О.И.* Закономерности движения рыхлого материала на лесостепных склонах в Назаровской впадине (по результатам стационарных наблюдений) // География и природные ресурсы. 1982. № 2. С. 98–103.
2. *Бураков Д.А., Иванова О.И.* Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири. М., Метеорология и гидрология, 2010, № 6, с. 87–100.
3. *Бураков Д.А., Маркова Е.Э.* Эрозия почв: учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2009. 160 с.
4. *Голубев И.А.* Исследование водной эрозии почв в зоне равнинной лесостепи Красноярского Края // Вестник КрасГАУ. 2009. № 4(31). С. 149–152.
5. *Голубев И.А.* Смыв почв талыми водами на пашне северной части Красноярской лесостепи // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 360. С. 172–175.
6. *Голубев И.А.* Уточнение региональной методики расчета потенциального смыва почв от талых вод для северной лесостепи Средней Сибири // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155. № 3–4. С. 17–29. <https://doi.org/10.31857/S0869607123030060>.
7. *Голубев И.А.* Эрозия почв от талых вод на сельскохозяйственных землях Красноярской лесостепи: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Голубев Игорь Александрович. Красноярск, 2022.
8. *Евсеева Н.С.* Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
9. *Иванова О.И.* Гидрологический анализ и прогноз весеннего половодья лесных и лесостепных рек Средней Сибири: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Иванова Ольга Игоревна. Красноярск, 2011.
10. *Калужный И.Л., Павлова К.К.* Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 159 с.
11. *Киселев П.Г.* Справочник по гидравлическим расчетам. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. 242 с.
12. *Кнауб Р.В.* Географический анализ факторов поверхностного смыва и оценка современной эрозии на пахотных землях Томь-Яйского междуречья (в пределах Томской области): дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Кнауб Роман Викторович. Томск, 2006.
13. *Комаров В.Д.* Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР. М.: Гидрометеиздат, 1959, 295 с.
14. *Комаров В.Д., Макарова Т.Т., Синегуб Е.С.* Расчет гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния // Труды Гидрометцентра СССР. 1969. Вып. 37.

15. Орлов А.Д. Водная эрозия почв Новосибирского Приобья / отв. ред. Ковалев Р.В. Новосибирск: Изд-во «Наука» Сиб. отд., 1971.
16. Петенков А.В. Количественная оценка неполноты минимального стока малых неизученных рек // Труды V Всесоюзного Гидрологического съезда. Т. 6. Теория и методы гидрологических расчетов. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 479–484.
17. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1979, 256 с.
18. Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири / под ред. О.И. Баженовой, Е.М. Любцовой, Ю.В. Рыжова, С.А. Макарова. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1997. 208 с.
19. Руководство по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Вып. 1. 358 с.
20. Танащенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозионных процессов: Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН, Ин-т почвоведения и агрохимии СО РАН; науч. ред. И.М. Гаджиев. Новосибирск, 1999. 89 с.
21. Танащенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 176 с.: ил.
22. Шикун А.К., Рожков А.Г., Трегубов П.С. К вопросу картирования территории по интенсивности эрозионных процессов // Оценка и картирование эрозионно-опасных и дефляционноопасных земель. М., 1973.
23. Grawford N.H. and Linsley R.K. A conceptual model of hydrologic cycle. Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. 1963. № 63.
24. Hayashi M., van der Kamp G., Schmidt R. Focused infiltration of snowmelt water in partially frozen soil under small depressions. // Journal of Hydrology, 2003. V. 270. P. 214–229.

The Specifics of the Development of Soil Flushing During Spring Snowmelt in the Arable Land of the Northern Zone of the Krasnoyarsk Forest-Steppe

I. A. Golubev^{1,*}, O. I. Ivanova^{2,**}

¹Branch of PJSC “Rosseti Sibir” – “Krasnoyarskenergo”, Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: igorgol1984@bk.ru

**E-mail: ivolga49@yandex.ru

Abstract – The results of studies of soil flushing and accumulation in the period 2009–2017 in the northern part of the Krasnoyarsk forest-steppe in areas with high intensity of erosive and accumulative processes are presented. A wide range of erosion values from meltwater has been established – from 0.4 to 25 mm for the spring period. The results of the application of a refined Regional model for calculating potential flushing for the northern part of the Krasnoyarsk forest-steppe are presented. The analysis of meteorological factors and conditions of the underlying surface affecting the distribution of values of melt runoff, flushing and accumulation of soils on arable massifs located on inclined watershed surfaces is carried out: the specificity of the distribution of meltwater flows determines the formation of zones of extreme erosion along the perimeter of arable land in the lower parts of the slope – up to 15–20 mm of soil layer. In conditions of low slope steepness, the effect of relief on erosion is largely determined by the high slope lengths and melt water flow lines. The distribution of flushing values over the area of arable land shows a close correlation with the values of snow accumulation and soil moisture. The spatial and temporal patterns of the influence of the previous autumn

soil moisture on the intensity of erosion have been established: the values of flushing increase with increasing soil moisture, the average values of erosion correlate with the values of autumn soil moisture in dynamics over the years of field observations. Special soil protection measures have been proposed for sites with the most intensive flushing in the research area.

Keywords: flushing, slopes, meltwater, surface runoff, snow accumulation, snowmelt intensity, autumn humidification

REFERENCES

1. Bazhenova O.I. Zakonomernosti dvizheniia rykhlogo materiala na lesostepnykh sklonakh v Nazarovskoi vpadine (po rezul'tatam statsionarnykh nabliudenii) // *Geografiia i prirodnye resursy*. 1982. № 2. P. 98–103.
2. Burakov D.A., Ivanova O.I. Analiz formirovaniia i prognoz stoka vesennego polovod'ia v lesnykh i lesostepnykh basseinaх rek Sibiri. M., Meteorologiya i gidrologiya, 2010, № 6, s. 87–100.
3. Burakov D.A., Markova E.E. Eroziia pochv: ucheb. posobie. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t., 2009. 160 p.
4. Golubev I.A. Issledovanie vodnoi erozii pochv v zone ravninnoi lesostepi Krasnoyarskogo Kraia // *Vestnik KrasGAU*. 2009. № 4(31). P. 149–152.
5. Golubev I.A. Smyv pochv talymi vodami na pashne severnoi chasti Krasnoyarskoi lesostepi // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012. № 360. P. 172–175.
6. Golubev I.A. Utochnenie regional'noi metodiki rascheta potentsial'nogo smyva pochv ot talykh vod dlia severnoi lesostepi Srednei Sibiri // *Izvestiia Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2023. V. 155. № 3–4. P. 17–29. <https://doi.org/10.31857/S0869607123030060>.
7. Golubev I.A. Eroziia pochv ot talykh vod na sel'skokhoziaistvennykh zemliakh Krasnoyarskoi lesostepi: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27 / Golubev Igor' Aleksandrovich. Krasnoyarsk, 2022.
8. Evseeva N.S. Sovremennyy morfolitogenez iugo-vostoka Zapadno-Sibirskoi ravniny. Tomsk: Izd-vo NTL, 2009. 484 p.
9. Ivanova O.I. Gidrologicheskii analiz i prognoz vesennego polovod'ia lesnykh i lesostepnykh rek Srednei Sibiri: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27 / Ivanova Olga Igorevna. Krasnoyarsk, 2011.
10. Kaliuzhnyi I.L., Pavlova K.K. Formirovanie poter' talogo stoka. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 159 p.
11. Kiselev P.G. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam. M-L.: Gosenergoizdat, 1957. 242 p.
12. Knaub R.V. Geograficheskii analiz faktorov poverkhnostnogo smyva i otsenka sovremennoi erozii na pakhotnykh zemliakh Tom'-Iaiskogo mezhdurech'ia (v predelakh Tomskoi oblasti): dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.23 / Knaub Roman Viktorovich. Tomsk, 2006.
13. Komarov V.D. Vesennii stok ravninnykh rek Evropeiskoi chasti SSSR. Moskva: Gidrometeoizdat, 1959, 295 p.
14. Komarov V.D., Makarova T.T., Sinegub E.S. Raschet gidrografa polovod'ia nebol'shikh ravninnykh rek na osnove dannykh ob intensivnosti snegotaianiia // *Trudy Gidromettsentra SSSR*. 1969. Vyp. 37.
15. Orlov A.D. Vodnaia eroziia pochv Novosibirskogo Priob'ia / otv. red. Kovalev R.V. Novosibirsk: Izd-vo «Nauka» Sib. otd., 1971.
16. Petenkov A.V. Kolichestvennaia otsenka nepolnoty minimal'nogo stoka malykh neizuchennykh rek // *Trudy V Vsesoiuznogo Gidrologicheskogo sezda*. V. 6. Teoriia i metody gidrologicheskikh raschetov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. S. 479–484.
17. Popov E.G. Gidrologicheskie prognozy. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 256 p.

18. Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki erozionnykh protsessov na iuge Vostochnoi Sibiri / pod red. O.I. Bazhenovoi, E.M. Liubtsovoi, I.U.V. Ryzhova, S.A. Makarova. Novosibirsk: Nauka. Sib. predpriiatie RAN, 1997. 208 p.
19. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. Vyp. 1. 358 p.
20. Tanasienko A.A., Putilin A.F., Artamonova V.S. Ekologicheskie aspekty erozionnykh protsessov: Analit. obzor / GPNTB SO RAN, In-t pochvovedeniia i agrokhimii SO RAN; nauch. red. I.M. Gadzhiev. Novosibirsk, 1999. 89 p.
21. Tanasienko A.A. Spetsifika erozii pochv v Sibiri. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. 176 p.: il.
22. SHikula N.K., Rozhkov A.G., Tregubov P.S. K voprosu kartirovaniia territorii po intensivnosti erozionnykh protsessov // Otsenka i kartirovanie erozionno-opasnykh i defliatsionnoopasnykh zemel'. Moscow, 1973.
23. Grawford N.H. and Linsley R.K. A conceptual model of hydrologic cycle. Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. 1963. № 63.
24. Hayashi M., Van der Kamp G., Schmidt R. Focused infiltration of snowmelt water in partially frozen soil under small depressions. // Journal of Hydrology, 2003. V. 270. P. 214–229.