

На правах рукописи



Голубев Игорь Александрович

**ЭРОЗИЯ ПОЧВ ОТ ТАЛЫХ ВОД НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ
КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО Красноярский государственный аграрный университет

Научный руководитель:	Бураков Дмитрий Анатольевич, д-р геогр. наук, профессор кафедры Природообустройства ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ
Официальные оппоненты:	Чалов Сергей Романович, д-р геогр. наук, заместитель декана по международным связям, Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова Бобровицкая Нелля Николаевна, д-р геогр. наук, заведующая отделом мониторинга и экспедиционных исследований (ОМ и ЭИ) Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный гидрологический институт»
Ведущая организация:	Институт Географии им. В.Б. Сочавы СО РАН

Защита состоится «16» сентября 2022 г. в 11 00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.046.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «_____» _____ 20__ г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета Д 002.046.04, Зайцевой И.С.
Факс 8 (495) 959-00-33, e-mail: d00204604@igras.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат географических наук



И.С. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность работы. Важность изучения процессов водной эрозии почв обусловлена истощением и деградацией верхних плодородных слоев почвенного покрова, ухудшением его агрохимических и физических свойств в процессе смыва и размыва талыми и дождевыми водами. Это приводит к существенному снижению урожайности и серьезному урону для сельского хозяйства.

На территории Сибири существенное влияние на развитие эрозии почв оказывают талые воды. Во многих случаях они имеют первостепенное значение по отношению к ливневым водам вследствие формирования на обширной территории значительных запасов воды в снеге в зимний период. Это определяет одновременный широкий охват водно-эрозионными процессами больших площадей пахотных угодий в период снеготаяния.

Детальные исследования эрозии почв в Западной и Восточной Сибири, а также в южной части лесостепной и степной зон Средней Сибири начались в советское время. Проводились исследования и в Красноярской лесостепи (северная лесостепь Средней Сибири), однако основное внимание в них уделялось овражной эрозии. Исследования непосредственно ручейковой эрозии на пашне проводились только эпизодически в ходе других работ. Их итоги не публиковались и во многом были утрачены. Таким образом изученность водной эрозии в данном районе недостаточна и не характеризует современный период. Представленные ниже результаты исследований автора диссертации в определенной мере восполняют этот пробел.

Цель работы: определить основные закономерности влияния стока талых вод на эрозионно-аккумулятивные процессы на пахотных землях Красноярской лесостепи.

Объект исследования – центральная и северная часть Красноярской лесостепи.

Предмет исследования - процессы формирования смыва почв в период снеготаяния на пахотных массивах.

Задачи работы:

1. Выполнить адаптацию используемых полевых методов исследования эрозии почв от талых вод для их применения на пашне лесостепной зоны Средней Сибири.
2. Определить интенсивность водной эрозии на пашне северных лесостепных участков Приенисейской высокой равнины (Красноярская лесостепь) в период снеготаяния.
3. Оценить степень воздействия основных гидрометеорологических факторов и условий подстилающей поверхности на процессы смыва от талых вод.

4. На основании результатов полевых исследований разработать предложения по адаптации методик расчета потенциального смыва для их применения в условиях Красноярской лесостепи.

Методическими основами исследования являются экспериментальные методы натурных наблюдений смыва и аккумуляции, методики расчета поверхностного стока, потенциального смыва почв, отечественные и зарубежные исследования твердого стока и эрозионно-аккумулятивных процессов (Musgrave, 1947; Соболев, 1948; Балян, Раменский, 1954; Wischmeier, Smiss D.D, 1965, Сурмач, 1976; Бобровицкая, 1977; Бобровицкая 1986, Литвин, 1987; Методические указания..., 1989; Коронкевич, 1990; Гидрологические основы водопользования..., 1990; Современная интенсивность...1991; Чернышев, 1992, Ларионов, 1993; Танасиенко, 2003; Голосов, 2006; Бураков, 2009; Евсеева, 2009; Барабанов, 2017; Чалов, 2021; и др.).

Исходные данные, положенные в основу выполнения работы:

- полевые исследования автора диссертации в центральной и северной части Красноярской лесостепи;
- материалы метеорологических, агрометеорологических и гидрологических наблюдений Красноярского УГМС;
- отечественные и зарубежные публикации результатов работ, посвященных изучению склоновых делювиальных, эрозионно-аккумулятивных процессов.

Диссертация подводит итог исследований эрозионно-аккумулятивных процессов, проведенных автором в 2009-2011, 2013, 2017 гг.

Научная новизна работы:

1. Впервые применен метод шпилек для оценки интенсивности смыва и аккумуляции почв от талых вод на пашне лесостепной зоны Центральной Сибири; произведена модернизация данного метода, учитывающая местные особенности сезонно-мерзлотного режима почв. Это улучшает точность метода шпилек и делает возможным его применение при оценке смыва и аккумуляции почв от талых вод в условиях Сибири.
2. Получены количественные показатели эрозионно-аккумулятивных процессов на пахотных землях исследуемой территории.
3. Выполнен анализ преобладающих гидрометеорологических факторов смыва почв от талых вод в Красноярской лесостепи; установлено значительное влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и поступления воды на поверхность почвы на интенсивность эрозии в районе исследований.
4. Сформулированы предложения по адаптации методик расчета потенциального смыва для условий Красноярской лесостепи, учитывающие местные природно-

климатические особенности.

Защищаемые положения:

1. Адаптированные к условиям лесостепи Средней Сибири методические подходы к экспериментальным наблюдениям за смывом почв на пашне, учитывающие их сезонно-мерзлотный режим и специфику формирования конусов выноса в нижних частях микроводосборов.
2. Выявленные особенности пространственного распределения смыва почв от действия талых вод. Установлено, что в северной части Красноярской лесостепи вследствие различий гидрометеорологических условий, рельефа и растительности интенсивность смыва почв в среднем в 1,9 раза выше, чем в центральной.
3. Результаты региональной оценки влияния гидрометеорологических факторов на эрозионно-аккумулятивные процессы. Установлено, что на исследуемой территории предшествующее осеннее увлажнение почв является значимым гидрометеорологическим фактором, заметно влияющим на интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в период снеготаяния.
4. Результаты расчета потенциального смыва почв в Красноярской лесостепи, полученные на основе адаптации существующих методик к местным природно-климатическим условиям с учетом показателей предшествующего осеннего увлажнения почвенного покрова и интенсивности поступления воды на поверхность почвы в период снеготаяния показывают значения, близкие к измеренным величинам.

Практическая значимость:

1. Модернизация экспериментальных методик измерения смыва, учитывающая местные особенности сезонно-мерзлотного режима почв. В частности, модернизация метода шпилек позволяет зафиксировать величины мерзлотного пучения-опускания почв и исключить их из показаний шпилек. Это улучшает точность данного метода и делает возможным его применение при измерении смыва и аккумуляции почв от талых вод в условиях Средней Сибири.
2. Адаптация методик расчета потенциального смыва для их применения в условиях Средней Сибири, позволяющая уточнить расчетные величины снеготалой эрозии и в дальнейшем на их основе более эффективно и рационально планировать комплекс противоэрозионных мероприятий. Это приведет к снижению деградации пахотных земель от эрозии и увеличения урожайности сельскохозяйственных культур.

Апробация работы. Ключевые положения диссертации докладывались и обсуждались на совместных семинарах Лабораторий Гидрологии, Климатологии, отдела Гляциологии Института Географии РАН; семинаре кафедры Гидрологии Суши и НИЛ

Эрозии почв и Русловых процессов им. Н.И. Маккавеева Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; IV Международной конференции «Агробизнес, экологический инжиниринг и биотехнологии» - AGRITECH IV - 2020 (г. Красноярск, 2020 г.), Всероссийской конференции «Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин» (г. Томск, 2012 г.), IX региональной научно-практической конференции молодых ученых СФО «Инновации молодых учёных аграрных вузов - агропромышленному комплексу Сибирского региона» (г. Омск, 2011 г.), III Международной (заочной) научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные тенденции развития Российской науки» (г. Красноярск, 2010 г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии, защиты растений и экологического земледелия» (г. Саратов, 2009 г.). Материалы данной работы использованы в учебном процессе при проведении практических занятий в ФГБОУ ВО "Красноярский государственный аграрный университет" на кафедре Природообустройства по курсам "Эрозия почв", "Климат почв".

Публикации. По теме диссертации опубликовано двенадцать работ, в том числе одна – в изданиях *Scopus*, две – в изданиях *Web of Science ESCI/RSCI*, две – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из 4 глав, введения, заключения, списка литературы и приложений. Текст диссертации представляет собой рукопись, изложенную на 247 страницах машинописного текста, включает 59 рисунков и 45 таблиц. Список литературных источников включает в себя 115 наименований. Приведенные в тексте диссертации таблицы, графики, рисунки и фотографии, если это не оговорено, разработаны автором диссертации.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру геогр. наук Д.А. Буракову за руководство научной работой на всех этапах исследования, д-ру геогр. наук Р.С. Чалову, д-ру геогр. наук Л.Ф. Литвину, д-ру геогр. наук Г.А. Ларионову, д-ру геогр. наук Н.С. Евсеевой, д-ру геогр. наук О.И. Баженовой, д-ру геогр. наук Ю.В. Рыжову, д-ру с.-х. наук Едимеичеву Ю.Ф., канд. геогр. наук Кожуховскому А.В., сотрудникам отдела гидрологических прогнозов Красноярского Гидрометцентра.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВ ДИССЕРТАЦИИ

Введение. Рассматривается актуальность работы, цели и задачи, объект, предмет

и методические основы исследования, научная новизна и защищаемые положения, практическая значимость результатов исследований и апробация работы.

Глава 1. Эрозия почв от талых вод (состояние изученности)

В данной главе приведены основные термины и понятия, даны описание и характеристика водно-эрозионных процессов. Приведены исторический обзор и развитие методов расчета эрозии почв (Бобровицкая, 1977; Ларионов, 1993; Musgrave, 1947 и др.), обзор результатов ранее выполненных лабораторных опытов, представлена характеристика проявления склоновой эрозии в различных природных зонах и ландшафтах. Акцентируется внимание на особенностях развития водной эрозии почв и результатах ранее выполненных исследований на территории Западной и Восточной Сибири (Орлов, 1983; Иванов, 1974; Баженова, 1984), в степи и южной части лесостепи Средней Сибири (Баженова, 1984; Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G., 2015 и др.); разработке Региональной методики для Красноярского края (Бураков, 2009). Следует отметить, что процессы эрозии почв от талых вод на пашне Средней Сибири в настоящее время недостаточно изучены, что определяет необходимость проведения детальных исследований.

Глава 2. Природные условия территории Красноярской лесостепи

В данной главе представлено описание природно-климатических условий объекта исследований.

Территория Красноярской лесостепи располагается на Кеть-Енисейской высокой, наклонной, всхолмленной аллювиальной равнине, расчлененной эрозионной деятельностью рек – левых притоков р. Енисей и р. Кеть. Представляет собой полузамкнутую впадину с открытым северо-западным краем. Рельеф северной части холмисто-увалистый, преобладающие уклоны на пахотных угодьях 3-5°; в центральной части – более пологий, преобладающие уклоны - до 3° (выровненные поверхности).

Климат резко континентальный. Зимний период имеет продолжительность около 5,5 месяцев, количество дней с морозом – 218, средний многолетний запас воды в снеге 60 мм, годовая сумма осадков – 450-550 мм. Среднегодовая температура воздуха -1,4°С. Преобладающее направление ветров – западное и юго-западное. Климатические условия обуславливают глубокое и сильное промерзание почвенного покрова, представленного преимущественно черноземами выщелоченными и серыми лесными почвами. Средняя глубина промерзания достигает максимальных значений к началу мая (170-220 см). Средняя дата полного оттаивания – 14 июня.

Растительный покров представляет собой сочетание лесной и лугово-лесной растительных формаций.

Гидрографическая сеть представлена рекой Енисеем и его притоками. В пределах рассматриваемой территории наиболее крупные притоки - среднее и нижнее течение р. Качи, Бузим, Нижняя Подъемная и др.

Величина слоя годового стока (y) в районе исследований составляет (для рр. Бузим и Нижняя Подъемная соответственно) от 60 до 138 мм, слоя весеннего стока – от 30,5 до 62,4 мм.

Доля пашни составляет в среднем 33 %. В весенний период около 75 % территории пашни занято стерней, около 25 % - зябь и озимые культуры.

Глава 3. Развитие экспериментальных и расчетных методов изучения эрозионно-аккумулятивных процессов от талых вод на пашне Красноярской лесостепи

В начале главы представлено краткое описание известных экспериментальных и расчетных методов изучения процессов смыва и аккумуляции почв. Акцентируется внимание на методах, примененных автором для исследований на пашне Красноярской лесостепи; представлены экспериментальные методы шпилек, обмера водороев (метод С.С. Соболева), обмеров конусов выноса. Приведено описание известных расчетных моделей (Бобровицкая, 1977; Ларионов, 1993; Методические указания..., 1989 и др.).

Характеристика опытных участков. Полевые исследования смыва почв проводились в центральной и северной частях Красноярской лесостепи (рисунок 1).

- северная часть – простирается примерно на 40 км с юга от р. Шила на север до постепенного перехода в зону подтайги, доля пахотных земель 21%;
- центральная часть – проходит от границы г. Красноярска на юге до р. Шила на севере, протяженность составляет примерно 20 км, доля пашни составляет 45%.

На исследуемой территории были выделены несколько опытных участков – основной (ключевой) в северной части и шесть дополнительных в центральной (далее по тексту – участки центральной части, рисунок 1).

Основной (ключевой) опытный участок – урочище Долгий Лог, представляет собой массив пашни площадью 520 га. Располагается в северной части Красноярской лесостепи, в 75 км севернее г. Красноярска. Является типичным для данной подзоны, по всему периметру окружен лесом. На данном участке производились исследования смыва модернизированным методом шпилек и методом С. С. Соболева (Соболев, 1948).

Участки центральной части располагаются в 50 км севернее г. Красноярска. Они представляют собой микроводосборы на территории пашни с различными показателями длины, крутизны, формы и экспозиции склона (рисунок 1). На данных участках проводились исследования смыва и аккумуляции почв методом обмера конусов выноса.

Опытные участки выбирались с учетом условий рельефа, типа агрофона и

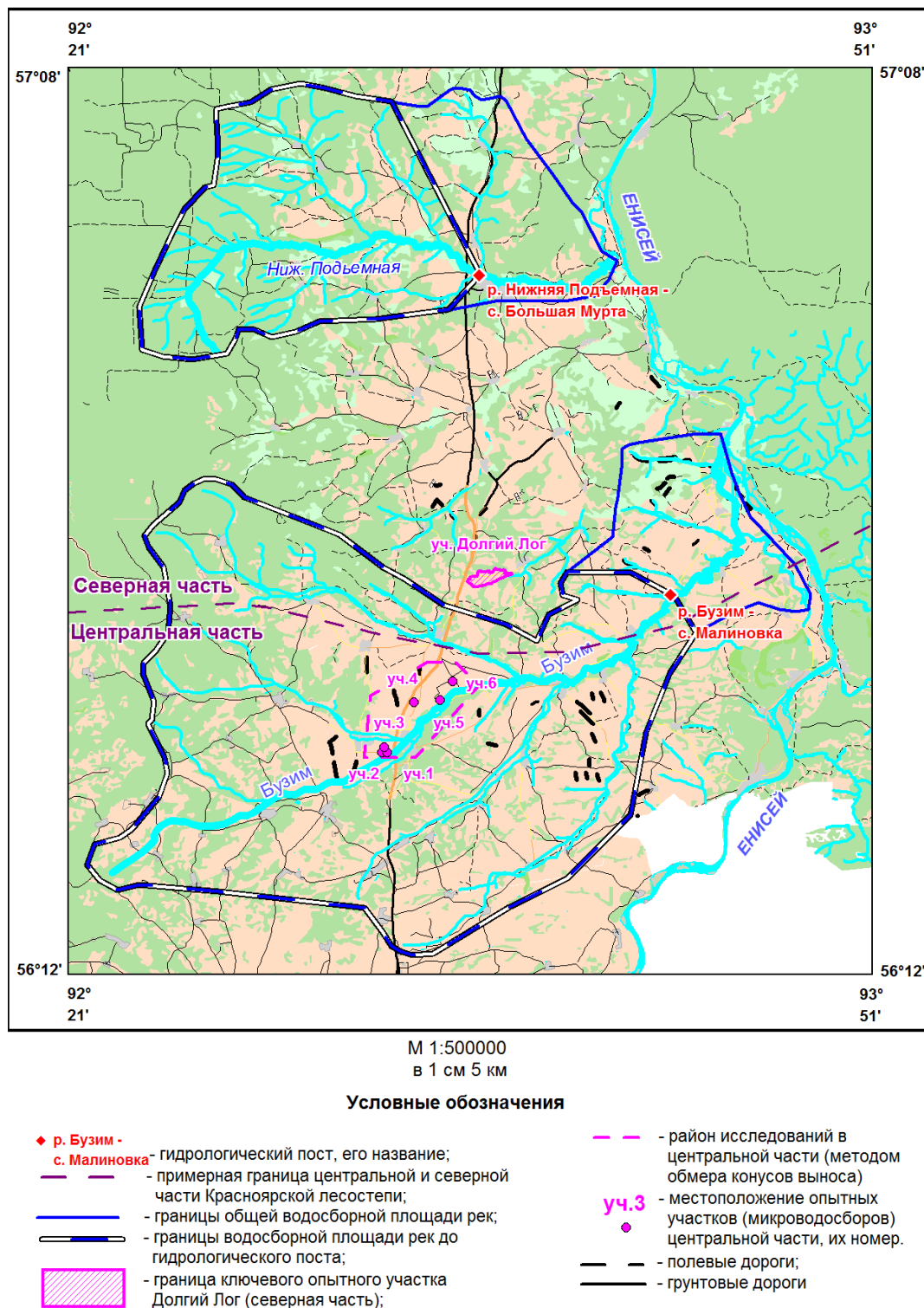
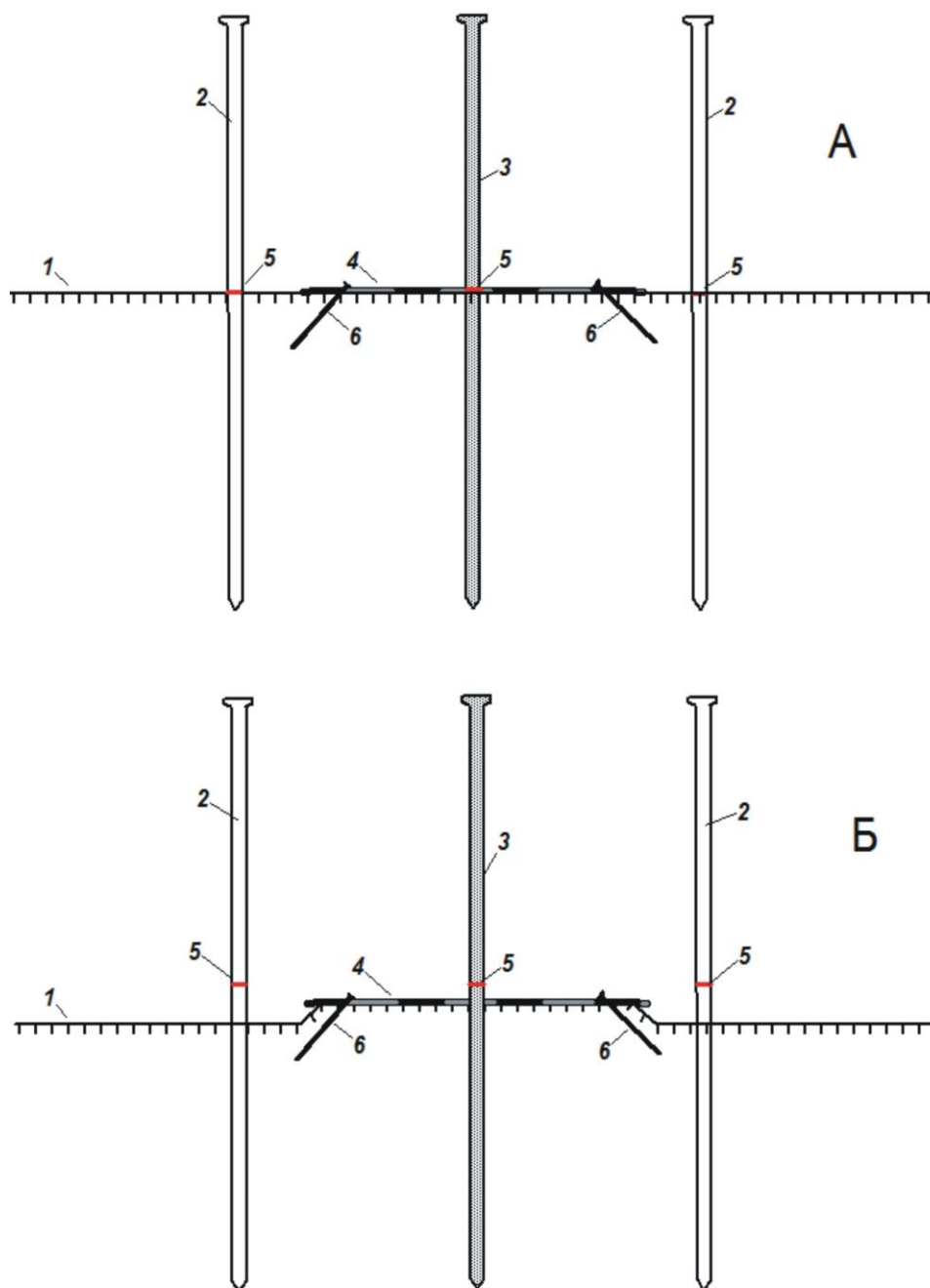


Рис. 1. Схема расположения опытных участков и водосборов ближайших рек в Красноярской лесостепи

экспозиции склонов и наличия цельных конусов выноса без явно видимых следов дальнейшей транспортировки наносов, что обуславливает максимальную точность определения объёма смытых частиц, а также с учетом возможности визуального определения границ микроводосборов.

Применение модернизированного метода шпилек (рисунок 2). Выбор данного метода обусловлен простотой и доступностью применения при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов. В то же время, данный метод позволяет определять баланс



Расположение группы шпилек (в профиле)

А - на момент установки; Б - в результате пучения и эрозионной работы талых вод

1 - уровень поверхности почвы; 2 - шпилька для учета смыва/аккумуляции;

3 - шпилька для учета пучения; 4 - пластина; 5 - отметка на шпильке;

6 - гвоздь для крепления пластины

Рис. 2. Схема установленной группы шпилек

наносов на различных элементах склонов; определить как величину смыва, так и аккумуляцию. В целях применения метода шпилек для исследования эрозии от талых вод в условиях сезонно-мерзлотного режима почв в Красноярской лесостепи, необходимо его адаптировать с учетом этих факторов. Для этого применялись металлические шпильки длиной 40 см и толщиной около 6-7 мм. Установка производилась в конце зимы группами от двух до четырех шпилек в мерзлую почву на глубину 17 – 20 см. В момент установки шпилек измерялась их надземная высота, а также делалась отметка на шпильке на уровне почвенной поверхности. Это позволяет фиксировать как смыв (обнажение шпилек, увеличение надземной высоты), так и аккумуляцию наносов.

Для учета гидротермических движений почвенного покрова в центр каждой группы шпилек была добавлена дополнительная шпилька с жестяной пластинкой, предохраняющей почву от смыва, на которую воздействуют только силы пучения-просадки (рисунок 2). На показания соседних шпилек воздействуют еще и процессы смыва почвы. Шпильки в группе, находящиеся на достаточно близком расстоянии друг к другу, характеризуются схожими условиями микрорельефа, увлажнения и промерзания почвы, следовательно, величина пучения-просадки будет примерно одинакова для всей их группы. Для определения величины смыва необходимо от отсчета каждой из основных шпилек в группе (смыв + опускание оттаявшего грунта) отнять величину опускания, зафиксированную центральной шпилькой с пластиной.

Таким образом, произведенная модернизация делает метод шпилек применимым для оценки смыва почв от талого стока на пашне в условиях Сибири.

Наблюдения проводились в различных элементах ландшафтной микрозональной структуры склонов речного бассейна (Чернышев и др., 1992), – в приводораздельной, прибровочной, среднесклоновой и частично нижнесклоновой микрозонах.

Полученные величины снеготалой эрозии для различных групп шпилек существенно различаются, измеренные данным методом значения смыва составляют от 0,4-1 до 30-40 мм.

Метод обмера водороев (метод С.С. Соболева). Смыв определяется делением объема струйчатых размывов на площадь микроводосбора. В авторских исследованиях метод использован на ключевом участке и частично на опытных участках центральной части. На ключевом участке величины смыва, полученные данным методом, в среднем составили от 1,2 на вершинах до 9 мм в нижних частях склонов.

Метод исследования смыва по конусам выноса. Суть метода состоит в определении объема обнаруженных конусов выноса (рисунок 3) произведением их площади на

среднее значение вертикальной мощности. Слой смыва вычислялся делением объема на площадь микроводосбора.

Достоинства данного метода обусловлены следующими обстоятельствами.



Рис. 3. Конус правильной геометрической формы (1), окруженный слоем аккумулярованных наносов меньшей гидравлической крупности (2) в пределах участка № 5 (май 2009 года).

- Возможность учесть основной объем смытого материала.
- Возможность определять объем выносов за отдельные годы при ежегодной распашке микроводосборов.

Результаты исследований смыва по конусам выноса представлены в таблице 1.

Таблица 1

Смыв почв на опытных участках центральной части

№ участка	Средний уклон, % (град)	Длина участка, м	Форма склона	Экспозиция	Площадь водосбора, м²	2009 г			2010 г			2011 г		
						Агрофон	Объем конуса выноса, м³	Смыв, мм	Агрофон	Объем конуса выноса, м³	Смыв, мм	Агрофон	Объем конуса выноса, м³	Смыв, мм
1	1,95 (1,1)	97	ровный	Ю	5987,8	пар	15	2,5	стерня	0,504	0,1	стерня	4,18	0,7
2	3,8 (2,2)	52	выпуклый	ЮЗ	1262,23		0,64	0,5		-	-		6,98	5,5
3	4,1 (2,3)	184	ступенчатый	С	10050,34		60,82	6,1		31,71	3,2		42,4	4,2
4	5,4 (3,1)	54	слабовогнутый	В	1640,5		5,3	3,2	пар	4,84	3,0	пар	4,78	2,9
5	3,1 (1,8)	67	слабовогнутый	В	3386,49		0,98	0,3	стерня	-	-	пшеница	-	-
6	2,8 (1,6)	126	вогнутый	СВ	8233,85		3,29	0,4	пшеница	-	-	пар	9,88	1,2

На участках центральной части производился контроль метода конусов выноса методом С.С. Соболева. Установлено, что расхождение в полученных результатах между данными методами составляет не более 1,1 мм. Данная разница может быть следствием выноса доли смытых частиц (до 15-20%.) за пределы пахотного микроводосбора.

Следует отметить, что метод шпилек показывает величину смыва в точке установки, в то время как метод С.С. Соболева и обмер конусов выноса позволяют оценить общую величину объема эрозии с площади всего водосбора.

Применение расчетных моделей. Произведен расчет величин потенциального смыва для опытных участков центральной части с использованием следующих методик:

- методика Государственного гидрологического института (модель ГГИ);
- методика, предложенная в методических указаниях по проектированию противоэрозионной организации территории при внутрихозяйственном землеустройстве в зонах проявления водной эрозии (Эу),
- Региональная методика, предложенная Д.А. Бураковым для территории Красноярского края (Эр).

Результаты расчета показывают, что полученные значения потенциального смыва ниже измеренных и составляют от 0,03 мм до 0,48 мм. Анализ результатов представлен в главе 4.

Глава 4. Факторы и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов на территории Красноярской лесостепи

Величина и распределение снежного покрова. Авторские снегомерные съемки показали, что на пашне северной части Красноярской лесостепи снегонакопление в среднем на 25-30% выше, чем центральной (рисунок 4).

В северной части преобладает равномерное снегонакопление (75% территории пашни), амплитуда колебаний снегозапасов не превышает 15 мм. Однако для ложбин и лощин, приопушечных зон северных и северо-восточных склонов (25% территории) характерно неравномерное залегание снега: вследствие метелевого переноса снегонакопление увеличивается в 1,5-2 раза. В приопушечных зонах амплитуда снегозапасов составляет в среднем 270 мм.

На опытных участках центральной части распределение снежного покрова имеет более равномерный характер из-за сокращения площади приопушечных зон и относительно пологого рельефа.

Интенсивность снеготаяния. Для Красноярской лесостепи произведены расчеты

снеготаяния (h_c) за каждый год наблюдений по температурным коэффициентам таяния для участков равномерного залегания на местности (Комаров, 1959; Бураков, Адамович 2003). Расчет поступления талой воды m осуществлялся для каждого года

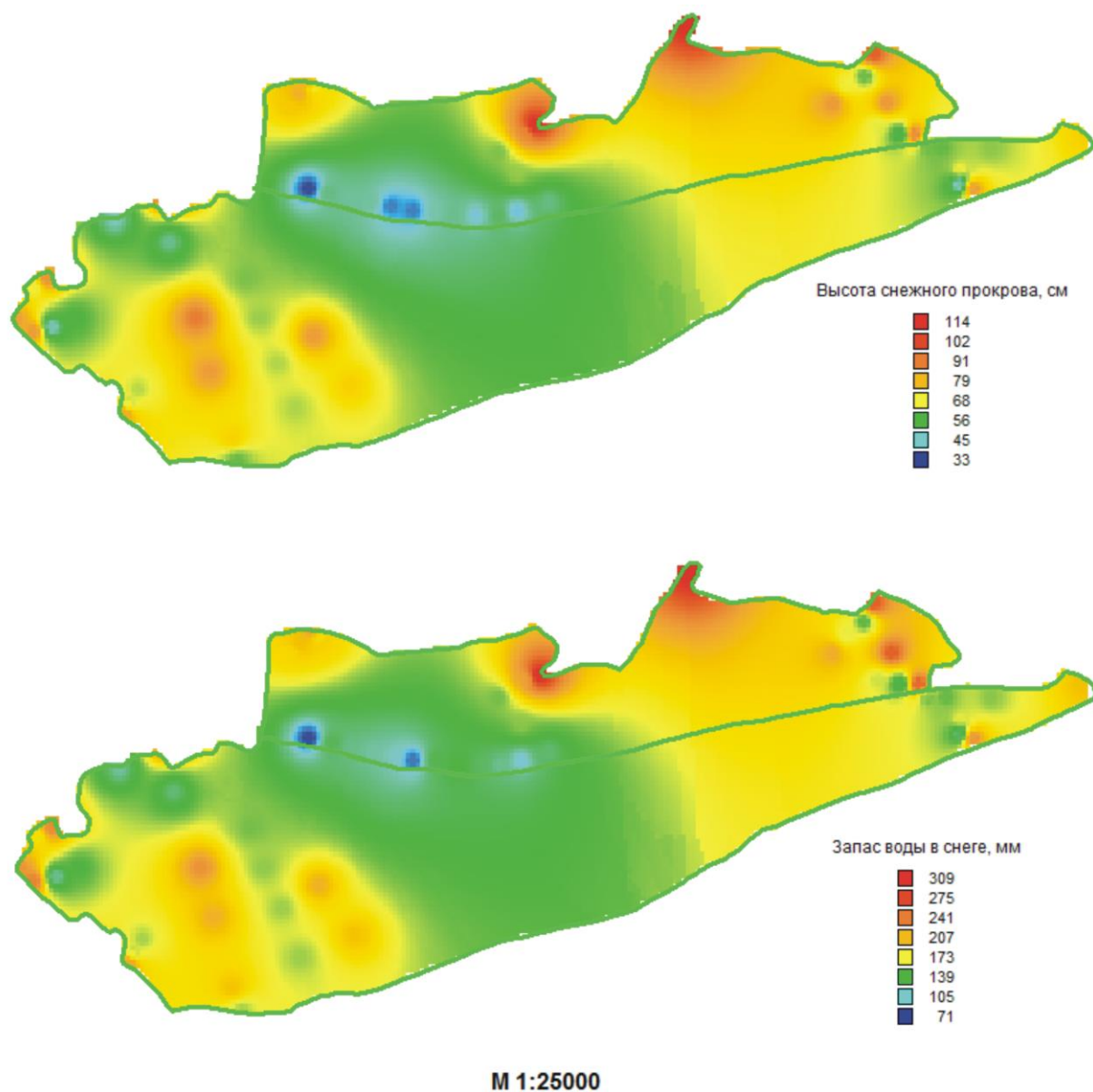


Рис. 4. Картограмма распределения высоты снежного покрова и запаса воды в снеге на участке Долгий Лог (осредненные данные за 2009-2017 гг.)

исследований по интенсивности снеготаяния и относительному сходу снега (l_0), при котором начинается отдача воды (Петенков, 1989; Попов, 1979). Для расчетов принималось среднее значение $l_0 = 0,13$. Результаты показали, что в зонах равномерного распределения снега средняя величина поступления воды составила для центральной части 4,6-12 мм/сут, для северной – 5,7-15,7 мм/сут; максимальное среднесуточное значение – 23,0-32,2 мм и 23,0-35,1 мм соответственно.

В северной части в зонах неравномерного залегания снега интенсивность поступления воды на почву в 1,5 – 2 раза превышают аналогичные значения участков равномерного залегания, максимальное расчетное поступление воды – 61,49 мм/сут. В завершающей фазе снеготаяния происходит при больших температуре воздуха и водоотдачи. Потоки талых вод характеризуются максимальными величинами скоростей и удельных расходов, что при прочих равных условиях заметно увеличивает интенсивность смыва. В пределах таких зон выявлены максимальные значения смыва за весенний период.

Характеристика стока весеннего половодья. Для характеристики весеннего стока использованы данные наблюдений на гидрологических постах ближайших к району исследований рр. Бузим и Нижняя Подъемная. Опытные участки центральной части расположены в бассейне р. Бузим, для определения их гидрологических параметров использованы данные поста в с. Малиновка. Участок Долгий Лог располагается в северной части между водосборами рассматриваемых рек (рисунок 1).

На основе данных с гидрологических постов были рассчитаны количественные характеристики стока весеннего половодья за каждый год полевых наблюдений (2009-2011, 2013, 2017 гг.). Величина слоя поверхностного талого стока Y для бассейнов рр. Бузим и Нижняя Подъемная в период полевых исследований составила для водосбора р. Бузим – от 16,9 мм до 64,1 мм, для водосбора р. Нижняя Подъемная – от 56,7 до 107,3 мм. Наибольшие значения отмечены в 2010 году, наименьшие – в 2017-м.

Для оценки обеспеченности весеннего стока использованы кривые обеспеченности расходов воды для р. Нижняя Подъемная – п. Большая Мурта и р. Бузим – с. Малиновка. Установлено, что исследования смыва почв производились при различных условиях водности: 2009, 2010 и 2013 гг. были многоводными, обеспеченность весеннего стока для этих лет составила (по данным для рр. Бузим и Нижняя Подъемная соответственно, таблица 2): 2009 год - 20-27 %, 2010 г – 4%, 2013 год – 6-13%; 2011-й год - средней водности (обеспеченность 47-55%); 2017-й год – маловодный (обеспеченность 53-82%). Таким образом, выбранные годы исследований по значениям водности в целом репрезентативны для территории Красноярской лесостепи.

Сравнение характеристик твердого стока в одной из ближайших рек (р. Нижняя Подъемная) и в микроручейковой сети на пахотных массивах северной части Красноярской лесостепи (уч. Долгий Лог) показывает, что на пашне величина мутности в 10-40 раз выше, чем в русле реки. Это обуславливается слабой защищенностью почвенного покрова от отрыва и транспортировки твердых частиц на пахотных массивах;

наличие длинных склонов и вспашка вдоль склона также способствуют увеличению мутности. Однако значения величин расходов наносов в русле реки значительно выше

Таблица 2

Модуль максимального весеннего стока ближайших рек

Год	р. Нижняя Подъемная		р. Бузим	
	М max ср.сут, л/с×км ² (обеспечен- ность, %)	М max срочн., л/с×км ² (обеспечен- ность, %)	М max ср.сут, л/с×км ² (обеспечен- ность, %)	М max срочн., л/с×км ² (обеспечен- ность, %)
2009	82,7(27)*	89,5 (22)	51,6 (20)	51,6 (17)
2010	148,5 (4)	152,3 (4)	71,3 (4)	71,3 (4)
2011	55,2 (55)	59,6 (50)	30,8 (47)	32,5 (47)
2013	100,0 (13)	110,7 (11)	66,8 (6)	66,8 (6)
2017	58,1 (53)	58,1 (55)	7,7 (82)	7,9 (82)

аналогичных характеристик для микроручейковой сети вследствие более высоких расходов воды (таблица 3).

Для сопоставления объема смытого материала на склонах и в эрозионно-русовой сети речных бассейнов выбран водосбор р. Бузим, в пределах которого расположены участки центральной части. Результаты расчетов показали, что в Красноярской лесостепи в бассейнах малых и средних рек в годы с высокой водностью (2009 и 2010 гг.) доля твердого стока со склонов, в процессе транспорта наносов достигающего русла реки,

Таблица 3

Сравнение средних характеристик твердого стока р. Нижняя Подъемная и микроручейковой сети на пахотных массивах
(уч. Долгий Лог, 2009-2011, 2013, 2017 гг.)

Год	Средний расход воды Q, м ³ /с (апрель, 3 дек.)		Мутность μ , г/м ³ (апрель, 3 дек.) *		Расход взвешенных наносов R, г/с	
	Талый сток на пашне	р. Нижняя Подъемная - п. Большая Мурта	Талый сток на пашне	р. Нижняя Подъемная - п. Большая Мурта	Талый сток на пашне	р. Нижняя Подъемная - п. Большая Мурта
2009	0,003	28,2	297,4	36	0,9	1015,2
2010	0,004	25,5	357,1	30	1,4	765
2011	0,003	23,7	510	12	1,5	284,4
2013	0,002	45,4	355	34	0,7	1543,6
2017	0,002	28,2	380	30	0,6	846

*) Использованы ежегодные данные с гидрологического поста р. Нижняя Подъемная-Большая Мурта и результаты авторских замеров на участке Долгий Лог в период полевых исследований.

составляет 1-2 %. В условиях средней водности (2011 г.) эта величина не превышает 0,4-0,5 %. На полученный результат могут оказывать влияние наличие водохранилищ на р.

Бузим, снижающих сток наносов, точность измерений и содержание частиц, которая является следствием размыва самого русла (Чалов, 2021).

Результаты измерений и расчетов по твердому стоку подтверждают общую закономерность формирования смыва в зависимости от размера водосборов – наибольшие модули стока и смыва наблюдаются в верхних звеньях гидрографической сети.

Увлажнение, промерзание и оттаивание почв. Исследованиями, выполненными для территории лесных и лесостепных районов Средней Сибири установлено, что с увеличением осеннего увлажнения и промерзания верхнего горизонта почвы снижаются потери талого стока (Иванова, 2011). Это согласуется с законом лимитирующих факторов поверхностного стока в период весеннего половодья (Барабанов, 2017).

Для территории Красноярской лесостепи автором рассчитан показатель предшествующего осеннего увлажнения почв за исследуемый период 2008-2017 гг. Поскольку выпавшие в сентябре осадки в большей степени успевают проникнуть в глубь почвенного профиля, за величину этого показателя принято суммарное поступление жидких осадков и талой воды (при потеплениях) за период с 1 октября до окончательного перехода температуры через 0°C (Бураков, Иванова, 2010; Попов, 1979). Результаты расчетов показали, что осеннее увлажнение изменяется от 28,9 до 57,6 мм.

Установлена зависимость средних величин смыва почв и грунтов за период снеготаяния от осеннего увлажнения почвенного покрова - с возрастанием увлажнения почв увеличивается интенсивность смыва (рисунок 5). Это происходит как по причине уменьшения потерь стока на впитывание, так и вследствие снижения противозерозионной стойкости: при насыщении верхних слоев почвы водой они становятся более подвержены эрозионным процессам, т.е. легче размываются.

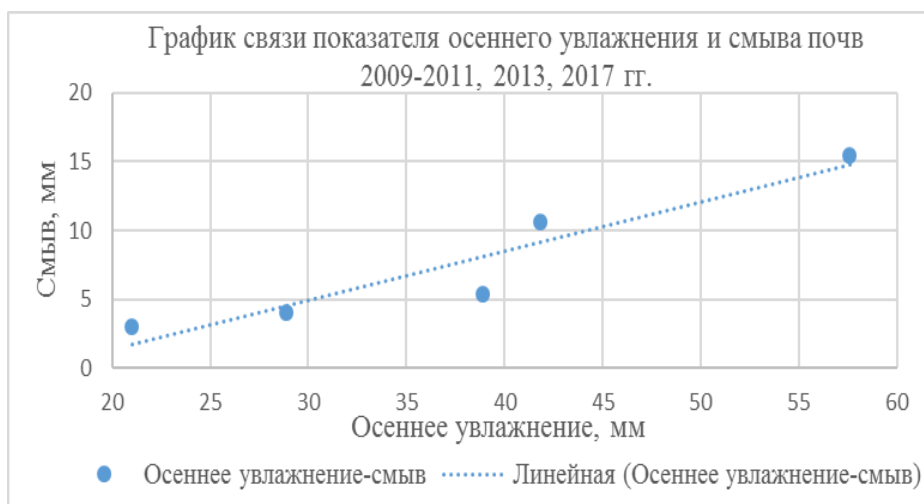


Рис 5. Связь предшествующего осеннего увлажнения и среднего смыва почв от талых вод (2009-2011, 2013, 2017 гг.)

Эрозионные процессы от талых вод на пашне Красноярской лесостепи. В северной части присутствуют эрозионные борозды и промоины, сформированные в процессе поверхностного стока. В распределении величин смыва по площади пахотных массивов присутствуют следующие закономерности.

- Массивы пашни в виде водораздельного плато.

1. Общее увеличение интенсивности смыва в направлении основного тока талых вод, вдоль общего уклона массива.

2. Увеличение смыва в направлении от водораздельной линии к нижней части каждого склона.

- Массивы пашни в виде обособленных склонов. При прочих равных условиях, эрозия увеличивается с повышением крутизны склона в направлении возрастания удельных расходов воды. У кромки леса в зоне максимального снегонакопления наблюдаются наибольший смыв (25,5 мм) и формирование конусов выноса (рисунок 6).

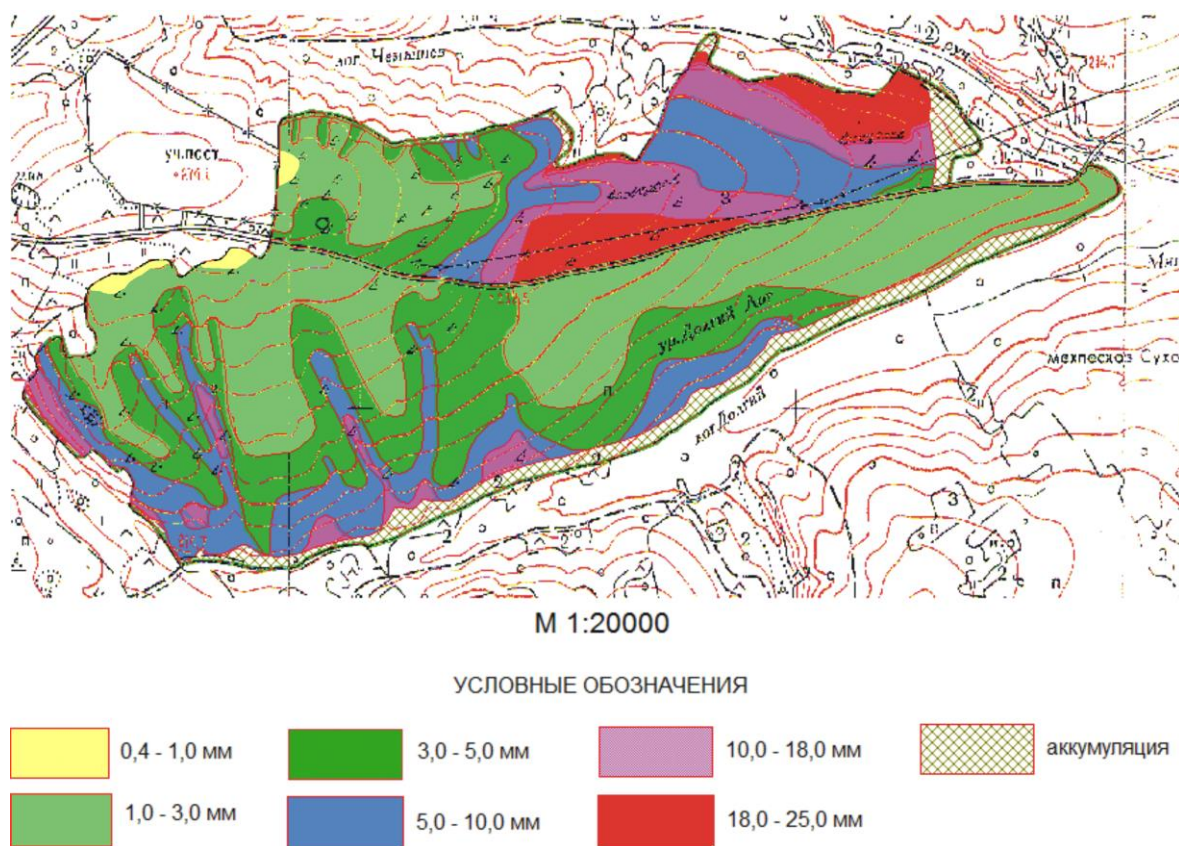


Рис. 6. Зонирование смыва почв от талых вод, уч. Долгий Лог для снегозапасов, близких к норме (усредненные данные за 2009-2017 гг.)

По результатам авторских измерений скорости, мутности потоков и размеров ручейковой сети на всех элементах склонов определены величины расходов воды. Установлено, что с их возрастанием увеличиваются величины смыва почв, $r = 0,87$ (рисунок 7).

Условия формирования стока и смыва почв в *центральной части* Красноярской лесостепи заметно отличаются от северной. На пашне центральной части в условиях меньшего снегонакопления и относительно равномерного распределения снега,

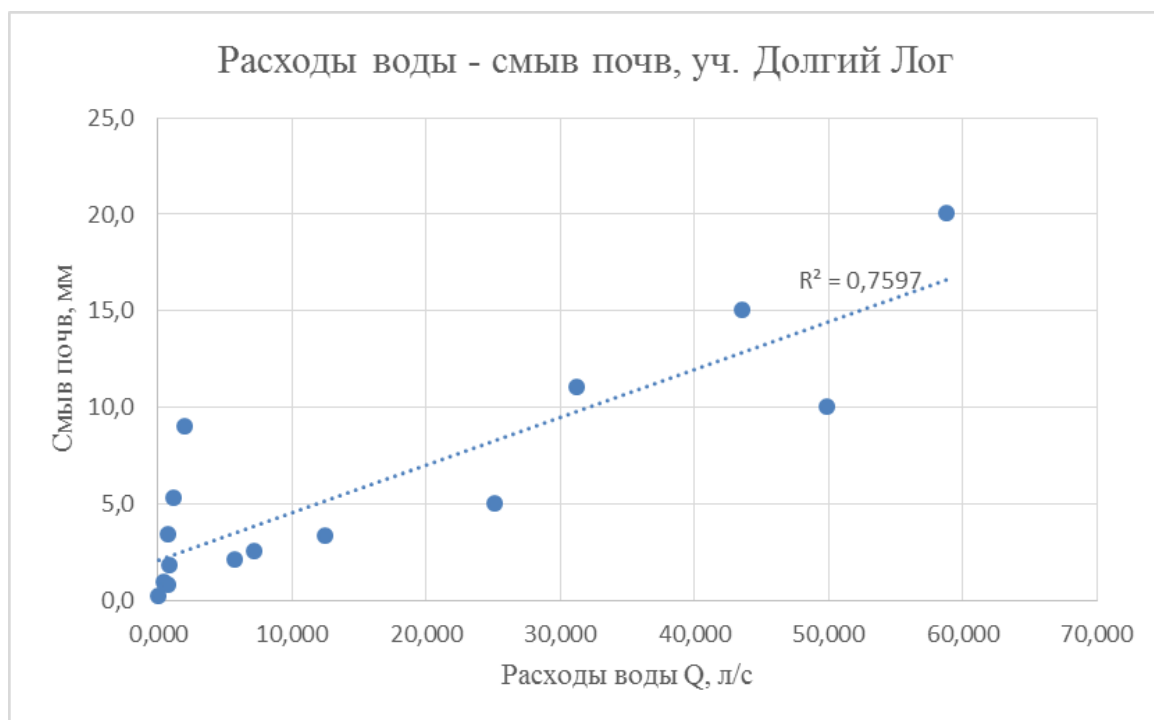


Рис 7. Зависимость между поверхностным стоком и смывом почв на пашне

меньшего количества лесной растительности и более пологого рельефа, различия в величинах смыва обусловлены в основном условиями агрофона (таблица 1). Вследствие вышеуказанных различий, интенсивность смыва в центральной части в среднем в 1,9 раза ниже, чем в северной.

Анализ результатов расчета потенциального смыва. Для оценки точности применения расчетных методик были рассчитаны следующие показатели ошибок: средняя ошибка (ME), среднеквадратическая ошибка (RMS), средняя абсолютная ошибка (MAI) и средняя относительная погрешность (E_{cp}).

Результаты исследований показывают, что примененные расчетные модели (раздел 3.4) для Красноярской лесостепи дают результаты, наиболее близкие к измеренным величинам и с наименьшими ошибками в годы с низким предшествующим осенним увлажнением почв. Осеннее увлажнение не учтено в расчетных моделях; соответственно, чем ниже данный показатель, тем меньше ошибка вычислений по отношению к измеренным величинам.

Произведен анализ влияния гидрометеорологических параметров на результаты примененных расчетных моделей (таблица 4). Установлена коррелятивная зависимость

Потенциальный смыв почв и гидрометеорологические данные,
центральная зона Красноярской лесостепи

№№ учас тков	Средний потенциальный смыв, мм *			Среднее суточное поступление воды на поверхность почвы, мм	Средний запас воды в снеге и осадки (S+X), мм (ст. Сухобузимское)	Слой поверхност ного стока (Y) р. Бузим - с. Малиновка, мм	Показатель предшеству ющего осеннего увлажнения, мм
	Эр	Эу	Э- ГГИ				
2009 год							
1	0,07	0,05	0,03	12,3	123,40	37,50	57,60
3	0,23	0,23	0,07				
4	0,29	0,38	0,12				
2010 год							
1	0,09	0,06	0,05	4,6	154,90	64,10	28,90
3	0,28	0,26	0,13				
4	0,35	0,41	0,22				
2011 год							
1	0,06	0,05	0,03	7,6	105,30	32,10	41,80
3	0,19	0,23	0,08				
4	0,24	0,36	0,13				

*) Приведены средние величины для каждого участка

вычисленных значений смыва с величинами S+X и слоем стока, которые учтены в методиках. В связи с отсутствием в расчетных моделях показателя осеннего увлажнения и интенсивности поступления воды на поверхность почвы, с данными показателями тесная коррелятивная связь не выявлена.

Для получения близких к измеренным расчетных величин смыва на территории Красноярской лесостепи, автором предлагается произвести уточнение расчетных моделей путем добавления корректирующего коэффициента (сомножителя K), который суммарно учитывает влияние осеннего увлажнения и поступления воды на почву.

С учетом вводимого сомножителя, формула Региональной методики Д.А. Буракова приобретает следующий вид:

$$\mathcal{E}_m = 4 \times K_m \times \Pi \times \Pi_0 \times P \times F \times K;$$

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 сомножитель, суммарно учитывающий влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и величину поступления воды из толщи

снега в весенний период. В годы с высоким осенним увлажнением (свыше 45 мм) $K= 3.1$; средним (30-45 мм) – $K= 2.8$, низким (менее 30 мм) – $K= 2.4$.

Анализ результатов авторских исследований. Максимальные величины смыва за период наблюдений отмечены на пашне северной части Красноярской лесостепи. Основные причины этого следующие.

- Повышенное снегонакопление, наличие приопушечных зон с неравномерным распределением снега и формированием поздневесенних сугробов. В этих условиях величины смыва выше на северных склонах с наибольшим снегонакоплением и более поздним сходом снега. В таких зонах противоэрозионная роль леса для пашни нивелируется, в лесных массивах происходит аккумуляция смытых почвенных частиц.
- Наличие длинных склонов (протяженностью от 500 до 2500 м) и линий тока, определяющих высокие удельные расходы воды и скорости течения;
- Обработка почвы вдоль склона. Вспашка вдоль склона многократно усиливает интенсивность эрозии.

Анализ влияния гидрометеорологических факторов (таблица 5) на величины

Таблица 5

Гидрометеорологические факторы и смыв почв,
северная часть Красноярской лесостепи, 2009-2017 гг.

Год	Дата измерения эрозии	Среднее поступление воды на поверхность почвы за период снеготаяния, мм	Средний запас воды в снеге и осадки (S+X), мм	Слой поверхностного стока весеннего половодья Y, мм		Расчетный показатель предшествующего осеннего увлажнения, мм	Средний измеренный смыв, мм
				р. Бузим – с. Малиновка	р. Нижняя Подъемная – п. Большая Мурта		
2009	26.апр	14,5	130,3	37,5	80,4	57,6	15,5
2010	10.май	5,7	154,9	64,1	107,3	28,9	4
2011	29.апр	6,6	105,4	32,1	56,7	41,8	10,6
2013	20.апр	10,5	105	43,6	79,4	38,9	5,4
2017	15.апр	15,7	110	16,9	71,2	21	3,0

смыва почв показал коррелятивную зависимость средних величин смыва от предшествующего осеннего увлажнения (рисунок 5), а также от водоотдачи при снеготаянии.

Величины смыва и поверхностного стока показывают тесную зависимость как во времени, так и в пространстве:

- При прочих равных условиях с возрастанием водности рассматриваемых лет

увеличивается средний смыв. Однако заметное влияние оказывает динамика величин осеннего увлажнения почв.

- Вследствие увеличения общего увлажнения территории, величина стока возрастает в направлении с юга (р. Бузим) на север (р. Нижняя Подъемная) (таблица 5). Это согласуется с различием средних значений эрозии в центральной и северной лесостепи. На пахотных склонах значения смыва увеличиваются вниз по склону с возрастанием расходов воды (рисунок 7).

Основные выводы

1. Выбранные годы полевых наблюдений (2009-2011, 2013, 2017гг.) в целом репрезентативны для Красноярской лесостепи и затрагивают характерные для рассматриваемого района условия водности.
2. Произведена модернизация метода шпилек, позволяющая учитывать величину гидротермических движений почв.
3. Обоснованы критерии использования метода обмера конуса выноса, выбора опытных участков для количественных оценок интенсивности эрозии.
4. В северной части Красноярской лесостепи смыв почв от талых вод в среднем в 1,9 раза выше, чем в центральной: диапазон значений составляет в северной части от 0,4 мм до 30 мм, в центральной – от 0,1 мм до 5,5 мм. Это объясняется относительно равномерным залеганием снежного покрова в условиях более пологого остепненного рельефа, меньшем количестве снега и лесных массивов в центральной лесостепи по сравнению с северной.
5. Интенсивность эрозии на различных элементах пахотных массивов в северной и центральной частях Красноярской лесостепи изменяется от «слабой» до «катастрофической» (по классификации Шиккула, Рожков, Трегубов, 1973).
6. При прочих равных условиях, на полях, занятых паром и зябью, интенсивность эрозии в период весеннего половодья в среднем в 1,5-2 раза выше по сравнению с другими угодьями.
7. В северной лесостепи значительная длина большинства распаханых склонов и высокие удельные расходы воды в средней их части и подножьях в 3-8 раз увеличивают смыв почвы.
8. Пространственная изменчивость величин поверхностного склонового стока тесно коррелирует со значениями смыва ($r=0,87$). Величины талого стока в северной части Красноярской лесостепи в среднем в 1,5 раза выше, чем в центральной, это связано с

возрастанием общего увлажнения территории. Данный факт согласуется с разницей в величинах смыва в центральной и северной лесостепи.

9. Смыв почвы тесно коррелирует с осенним увлажнением, влияющим на величину талого стока, на впитывание и противозерозионную устойчивость почв.

10. В пределах пахотных массивов северной части лесостепи с увеличением снегозапасов интенсивность смыва почвы возрастает в среднем в 3-10 раз.

11. При прочих равных условиях, с увеличением суточного поступления воды на поверхность почвы интенсивность смыва возрастает в среднем в 1,5 раза.

12. Выполненное исследование показывает, что традиционно применяемые для оценки интенсивности эрозии методики (ГГИ, формулы «Указаний...», а также Региональная методика, ранее разработанная для Красноярского края) требуют уточнения в части влияния осеннего увлажнения почв и интенсивности поступления воды на поверхность почвы в период снеготаяния. Для Региональной методики предложены коэффициенты, суммарно учитывающие влияние вышеуказанных факторов: в годы с высоким осенним увлажнением 3,1 средним – 2,8, низким – 2,4.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных изданий и входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

1. Голубев И.А. Применение модернизированного метода шпилек для оценки смыва пашни талыми водами (на примере Красноярской лесостепи) // Вестник Томского государственного университета. – 2011. - № 347. – С. 170-173. (Web of Science (ESCI)).
2. Голубев И. А. Смыв почв талыми водами на пашне северной части Красноярской лесостепи // Вестник Томского государственного университета. – 2012. - № 360. – С. 172-175. (Web of Science (ESCI)).
3. Голубев И.А. Влияние талых вод на эрозионно-аккумулятивные процессы на пашне в центральной лесостепной зоне Красноярского края // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2021. – № 1 (165). – С. 24-29.
4. Голубев И.А., Кожуховский А.В., Иванова О.И. Влияние осеннего увлажнения почв на эрозионно-аккумулятивные процессы в Красноярской лесостепи // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. - № 1(379). – С. 130-142. – doi:10.37162/2618-9631-2021-1-130-142.

5. Golubev I.A., Burakov D.A., Kozhukhovskiy A.V. Overview of the IV International Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies – AGRITECH-IV-2020 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677(4). P.042089 (1-7). doi:10.1088/1755-1315/677/4/042089. (Scopus).

Публикации в других журналах и сборниках

6. Голубев И.А. Расчет показателей осеннего увлажнения почв и исследование снежного покрова на территории Красноярской лесостепи // Иновационные тенденции развития российской науки: мат-лы III Междунар. (заочной) науч.-практ. конф. молодых ученых / отв. ред. Ю.В. Платонова; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2010. – С. 59-60.
7. Голубев И.А. Исследования снежного покрова и водной эрозии почв в лесостепи Красноярского края // Актуальные проблемы экологии, защиты растений и экологического земледелия: Материалы Международной научно-практической конференции / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов: ИЦ «Наука», 2009. – С. 66-71.
8. Голубев И.А. Смыв почв талыми 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.
9. Голубев И.А. Особенности распространения и развития водной эрозии почв на территории Красноярского края // Ботанические исследования в Сибири. – Красноярск: Красноярское отделение Российского ботанического общества РАН, 2009. – Вып.17. – С. 8-11.
10. Голубев И.А. Постановка полевых экспериментов по изучению водноэрозионных процессов на пахотных землях Красноярского края // Ботанические исследования в Сибири. – Красноярск: Красноярское отделение Российского ботанического общества РАН, 2009. – Вып.17. – С. 12-15.
11. Голубев И.А. Проблема определения интенсивности водной эрозии почв в Сибири // Вестник КрасГАУ. – 2009. - №1. – С. 80-83.
12. Голубев И.А. Исследование водной эрозии почв в зоне равнинной лесостепи Красноярского края // Вестник КрасГАУ. – 2009. - №4. – С. 149-152.