

УДК 551.4.042+551.4.022

ЭРОЗИЯ ПОЧВ ПРИ СНЕГОТАЯНИИ В АГРОЛАНДШАФТАХ ЮГА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ: ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ, ИНТЕНСИВНОСТЬ И ДИНАМИКА

Евсеева Нина Степановна¹,
nsevseeva@yandex.ru

Петров Анатолий Иванович¹,
petrov.anatoliy1945@yandex.ru

Квасникова Зоя Николаевна¹,
zoi kwas@rambler.ru

Каширо Маргарита Александровна¹,
mkashiro@yandex.ru

Хон Алексей Валерьевич^{1,2},
avkhon@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055 г. Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность. Водная эрозия почв – одна из приоритетных экологических и экономических проблем современности. Это обусловлено тем, что почва – ограниченный ресурс, необходимый для производства продуктов питания, связывания углерода, регулирования воды и питательных элементов, фильтрации загрязняющих веществ, увеличения биоразнообразия и др. Зональные типы почв постоянно деградируют в результате роста численности населения, вырубки лесов и увеличения пахотных угодий, а также изменения климата. Хотя водная эрозия считается наиболее серьезной причиной деградации почв, глобальные закономерности эрозионной активности по-прежнему плохо поддаются количественной оценке, а последние имеют большую неопределенность. Для оценки величины смыва почв в настоящее время применяются различные методы – расчетные, полевые. Ряд методов использован исследователями и для определения смыва почв со склонов пашни южной части Томской области, но полученные данные противоречивы.

Цель: краткий обзор факторов развития эрозии почв при снеготаянии, оценка интенсивности и динамики ее проявления на основе многолетних полевых наблюдений и расчетных методов на пашне южных административных районов Томской области.

Объекты: сельскохозяйственные угодья (пашни) юго-востока Томской области.

Методы: полевые (маршрутные) наблюдения с отбором проб, расчетные, лабораторные и аналитические.

Результаты. Наши наблюдения показали, что эрозионноопасность сельскохозяйственных угодий юго-востока Томской области обусловлена комплексом взаимосвязанных природных и антропогенных факторов: рельефа, подстилающих пород и почв, климатических показателей, а также способов обработки земель. Среднегодовой смыв со склонов пашни региона за 34-летний период наблюдений варьирует от 2–5 до 16–30 м³/га за снеготаяние, местами достигая 50–80 м³/га. Согласно расчетным данным среднеегодовые значения модуля смыва колеблются в диапазоне 4,0–9,4 м³/га. Различия в оценках смыва почв, полученных разными методами, объясняются тем, что ни один из них не лишен недостатков и они требуют усовершенствования. В расчетах не учитывается неравномерность залегания снежного покрова, микрорельеф, наличие песчаников, форма склонов.

Ключевые слова:

Водная эрозия, снеготаяние, пашня, факторы развития эрозии почв, Томская область.

Введение

Эрозия почвы является основной формой ее деградации, поскольку более 1 млрд га почв во всем мире подвержены той или иной форме эрозии [1, 2]. При этом примерно 56 % площади деградированных почв обусловлено действием водной эрозии. Исследователи отмечают, что потери продуктивных земель составляют ежегодно не менее 5–7 млн га [2]. Под угрозой эрозии находится 75 % сельскохозяйственных и лесных угодий в Центральной Америке, 11 % – в Азии и др. [3]. Новые оценки указывают на ежегодные потери мирового внутреннего валового продукта в размере ~8 млрд долларов, снижение урожайности на 33,7 млн т и увеличение забора воды на 48 млрд м³

[4]. На территории России водной эрозии подвержено 17,8 % сельскохозяйственных земель, или 39,3 млн га, а около 32 % площади страны испытывают воздействие плоскостной (поверхностной) эрозии [2, 5, 6].

Изучению различных аспектов эрозионного процесса: варибельности факторов развития водной эрозии почв, ее количественной оценке, нормам смыва, методам исследования, в том числе моделирования, прогноза развития в XXI в. и др., посвящены работы ученых многих стран мира [1–2; 5–14], в том числе в последние годы [4, 15, 16].

Чаще всего различают водную эрозию при снеготаянии, дождевую и ирригационную. Эрозия почв от стока талых снеговых вод ежегодно развивается и на пашне южной части территории Томской области, где

сосредоточены ее основные площади (рис. 1). Оценки величины смыва почвы, полученные исследователями с применением различных методов, существенно отличаются: от 1–3 до 70–80 м³/га [17].

Цель данной работы – краткий обзор факторов развития эрозии почв при снеготаянии, оценка интенсивности и динамики ее проявления на основе многолетних полевых наблюдений и расчетных методов на пашнях ряда административных районов Томской области: Томского, Асиновского, Зырянского, частично Кожевниковского и Первомайского.

Объект, материалы и методы исследования

Объект исследования – сельскохозяйственные угодья (пашни) юга, юго-востока Томской области. Природные условия территории способствуют развитию эрозии почв при снеготаянии: значительные за-

пасы воды в снеге, легкоразмываемые почвогрунты, климат, геоморфологическое строение.

Роль рельефа в преобразовании энергии талых снеговых и дождевых вод в кинетическую энергию склоновых потоков значительная и сложная и зависит от его вертикального и горизонтального расчленения, крутизны, длины, формы склонов и их экспозиции. Вертикальное расчленение рельефа на пахотных землях исследуемого района изменяется от 0,5 до 40 м. Горизонтальное расчленение междуречий с пашнями балками достигает 2,0...2,5 км/км², т. е. на 1 км² сельскохозяйственных угодий встречается от 1 до 3–4 балок, например, на междуречье Басандайки и Ушайки – от 1 до 3 (табл. 1). На исследуемой территории водосборы балок в зависимости от их глубины и крутизны склонов распаиваются частично или полностью.

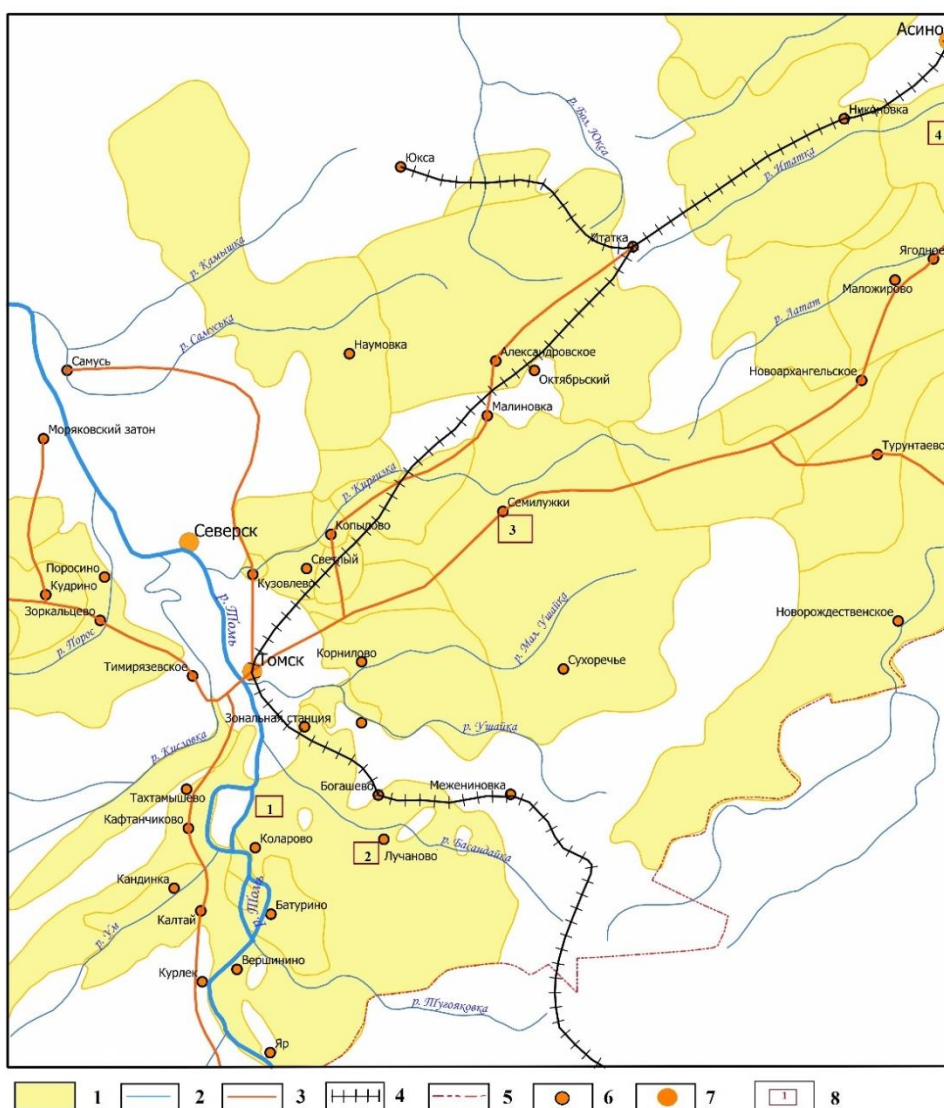


Рис. 1. Фрагмент схемы границ сельскохозяйственного землепользования юго-востока Томской области: 1) сельскохозяйственные земли; 2) реки; 3) автодороги; 4) железная дорога; 5) граница Томской и Кемеровской областей; 6) сельские населенные пункты; 7) городские населенные пункты; 8) ключевые участки: 1 – «10 км»; 2 – «Лучаново»; 3 – Семилужки; 4 – Большедорохово

Fig. 1. Fragment of the scheme of the boundaries of agricultural land use (white color) in the south-east of Tomsk region: 1) agricultural land; 2) rivers; 3) highways; 4) railway; 5) border of the Tomsk and Kemerovo regions; 6) rural settlements; 7) urban settlements; 8) key sites: 1 – «10 km»; 2 – Luchanovo; 3 – Semiluzhki; 4 – Bolshedorokhovo

Необходимым условием формирования стока талых вод является уклон земной поверхности. Крутизна склонов в агроландшафтах исследуемой территории изменяется от 0–1° до 5–7°, местами более (табл. 1). Наблюдения авторов и анализ литературных источников показывают, что на склонах такой крутизны эрозия почв варьирует от незначительной (до 0,5 т/га) до очень сильной (более 10 т/га). Длина склонов изменяется от 20–50 до 2000 м, но чаще составляет 300–500 м. Форма склонов различная: прямая, выпуклая, сложная; экспозиции склонов пашни также разнообразны – южные, юго-западные, юго-восточные, северные и др.

Таблица 1. Примеры горизонтального расчленения рельефа балками и уклонов земной поверхности на территории ряда участков юго-востока Томской области, наиболее вовлеченных в агропроизводство

Table 1. Examples of horizontal dissection of the relief by gullies and slopes of the earth's surface on the territory of a number of areas in the south-east of the Tomsk region that are most involved in agricultural production

Местоположение Deposit	Сочетание склонов по крутизне, градусы Combination of slopes in steepness, degrees	Количество балок на 1 км ² площади Number of gullies per 1 km ² of area
Левобережье р. Омутной (район с. Туган и Малиновки) Left bank of the river Omutnaya (area of Tugan and Malinovka villages)	0–1°, 1–3°, 3–5°, 5–7°	0–3
Междуречье в верховьях рек Юлы, Итатки, Латата, Куйлы Interfluvium in the upper reaches of the Yula, Itatka, Latat, Kuyula rivers	0–1°, 1–3°, 3–5°, 5–7°, 7–10°	1–4
Низовья бассейна р. Ушайка в районе Мирный–Корнилово Lower reaches of the river Ushayka in Mirny–Kornilovo area	0–1°, 1–3°, 3–5°	1–3
Междуречье р. Ушайки и Басандайки Ushayka and Basandayka interfluvium	0–1°, 1–3°, 3–5°, 10–13°	1–3
Левобережье р. Басандайки Left bank of the river Basandayka	1–3°, 3–5°, 5–7°, 7–10°	1–4
Бассейн р. Тугояковка в районе с. Овражное Basin of the river Tugoyakovka in the area of Ovrzhnoe village	1–3°, 3–5°, 5–7°, 10–13°	2–4
Низовья р. Латата и Китата Lower reaches of the rivers Latat and Kitat	0–1°, 1–3°, 5–7°	0–1
Междуречье Итатка–Кужербак Itatka–Kuzherbak interfluvium	0–1°, 1–3°, 5–7°	0–3

На интенсивность эрозии существенное влияние оказывают свойства материнских пород, на которых сформировался почвенный покров региона. С поверхности водораздельные равнины слагают лессо-

видные суглинки позднеплейстоценового и голоценового возраста. В их гранулометрическом составе преобладает пылеватая фракция – до 40–80 %, содержание CaCO₃ в них высокое – до 6–7 %, местами до 18,5 %. Мощность покровных лессовидных суглинков изменяется от 1–3 до 12 м, они неводостойкие [18].

Климат территории континентально-циклонический с холодной зимой и теплым влажным летом. Характерны вариации среднегодовых температур воздуха и количества осадков. Так, например, для Томска и окрестностей за последние 80 лет наблюдается увеличение среднегодовых температур: с 1936 по 1970 гг. – –0,3 °С, с 1971 по 2006 гг. – +0,7 °С, с 2001 по 2015 гг. – +1,2 °С [19].

Исследуемая территория характеризуется ежегодным формированием устойчивого снежного покрова (СП). В холодный период года выпадает около 30 % атмосферных осадков, отмечается тенденция их увеличения. Даты залегания устойчивого снежного покрова для Томского и Первомайского районов за период наблюдения с 1955 по 2016 гг. колеблются в пределах двух месяцев: самые ранние даты были зафиксированы 2–6 октября, поздние – 18–21 ноября, в среднем 23–26 октября. Средняя продолжительность залегания снега по двум метеостанциям этих южных районов составляла от 177 до 184 суток. Средняя толщина снежного покрова изменялась от 35 до 43 см [20].

За многолетний период наблюдений выявлена значительная изменчивость толщины снежного покрова по сравнению со средней. Так, максимальные значения толщины СП достигали на станции Первомайское 90 см (1965–1966 гг.); на станции Томск – 101 см (2000–2001 гг.) и 104 см (2014–2015 гг.), что существенно влияет на запасы влаги в снеге. Величина плотности СП варьировала от 0,18 до 0,34 г/см³. Средние запасы влаги в снеге за указанный период наблюдений на исследуемой территории изменялись от 111 до 169 мм, достигая в отдельные годы более 200 мм. Наиболее часто такие запасы наблюдались за 1955–2016 гг. на станции Томск – в 19,7 % случаев, с максимумом в 256 мм весной 2007 г. Более детально залегание снежного покрова на территории юга Томской области охарактеризовано в работах [20, 21].

Наши 34-летние (1988–2021 гг.) ландшафтно-геоморфологические снегосъемки в микромасштабе в агроландшафтах бассейна р. Басандайка вблизи с. Лучаново также выявили значительные колебания толщины снежного покрова в зависимости от микро-рельефа пашни, наличия лесополос, колков, экспозиции склонов. На склонах пашни северной экспозиции в среднем за 1988–2020 гг. толщина СП составила 57 см, достигнув 85 см в конце зимы 2009–2010 гг.; на распаханых склонах южной экспозиции средняя толщина СП составила 53 см, а максимум наблюдался в конце зимы 2009–2020 гг. – 80 см. Анализ данных снегосъемок показывает, что для залегания СП на пашне характерна значительная изменчивость и в пространстве: от 0–10 см на возвышенных участках и выпуклых наветренных склонах (рис. 2, А), до 211 см у лесополос (рис. 2, Б).

Вследствие чего наблюдаются существенные различия в запасе влаги в снеге: от 0–50 до 500–700 мм [21]. Подобные данные получены и на ключевом участке «10 км», например, в период снегосъемки 2004 г. толщина СП изменялась от 5 до 111 см при среднем значении 49 см. Средняя плотность снега составила $0,30 \text{ г/см}^3$, а запас влаги варьировал от 16 до 332 мм при среднем значении 147 мм.

Устойчивое промерзание почв происходит в ноябре. Глубина промерзания почв в значительной мере зависит от толщины СП на пашне и в среднем изменяется от 1–2 м при толщине СП 0–30 см, 0,7–1,35 м – при толщине СП в 30–50 м, 0,4–0,6 м – при толщине в 50–60 см [22].



А/А



Б/В

Рис. 2. Пространственная неоднородность мощности снегового покрова: А) на возвышенных участках и выпуклых наветренных склонах пашни; Б) у лесополосы Лучановского ключевого участка (фото М.А. Каширо, март 2020)

Fig. 2. Spatial heterogeneity of snow cover thickness: А) on elevated areas and convex windward slopes of arable land near the forest belt; В) near the forest belt of the Luchanovsky key site (photo by M.A. Kashiro, March 2020)

Начало снеготаяния на всех метеорологических станциях исследуемой территории приходилось на 28–31 марта, а его завершение – на 16–22 апреля. Продолжительность снеготаяния за 1955–2016 гг. изме-

нялась от 5 до 33 дней, а его среднемноголетняя продолжительность составила 18 дней (ст. Первомайское) и 22 дня (ст. Томск). Среднемноголетнее значение средней интенсивности снеготаяния за 1955–2016 гг. было равно: ст. Первомайское – 12,5–14,4 мм/сут, ст. Томск – 13,6–15,5 мм/сут. На полевых участках максимальная суточная интенсивность снеготаяния достигала 53,3–88,6 мм/сут, а максимальная часовая – 7,8 на ст. Томск [23]. По данным наших наблюдений за 1988–2020 гг. интенсивность снеготаяния составляла от 5,4–8,0 до 88,6 мм/сут.

Глубина оттайки почв во время снеготаяния по данным наших исследований изменяется от 1–15 см на склонах северной экспозиции, до 20–35 см на южных. Со склонов пашни по малым эрозионным формам – потяжинам, ложбинам, струйчатым размывам – происходит сток талой воды. Наши ежегодные наблюдения за скоростью воды в нерусловых потоках на склонах разной крутизны показали, что она изменяется по зяби от 1–10 см/с на склонах в $0-1^\circ$ до 0,5–0,7 м/с на склонах в $2-5^\circ$ и достигает 1,0–1,5 м/с на склонах $5-7^\circ$ и более. На таких склонах нередко образуются порожистые микрорусла, в которых наблюдаются «водопады» высотой до 0,5–0,8 м (рис. 3).

Активно эродирующие скорости склоновых микроруслов составляют в основном 0,2–0,7 м/с. Наши наблюдения за скоростями воды в нерусловых потоках хорошо согласуются с данными, полученными Л.Ф. Литвиным при изучении эрозии почв на пашне европейской части России [6]. А.Ф. Тимофеевым определена степень эрозионной опасности скоростей воды в микроруслах, которая в зависимости от крутизны склона различается: при крутизне склона $0-1^\circ$ и скоростях воды в 0,20–0,23 м/с она незначительная; при уклонах $1-2^\circ$ и скоростях 0,38–0,53 м/с – от слабой до выше средней; при крутизне $3-5^\circ$ и скорости 0,67 м/с – большая; при уклонах в $5-7^\circ$ и скорости 0,82 м/с – очень большая; при крутизне склонов 11° и скорости 1,06 м/с – чрезмерная [24].

В южной части территории Томской области в состав сельскохозяйственных угодий входят и используются под пашни в основном серые лесные и их разновидности, дерново-подзолистые почвы, их противозрозийная устойчивость низкая [18, 25].

Хотя водная эрозия считается наиболее серьезной причиной деградации почв во всем мире, глобальные закономерности эрозионной активности по-прежнему плохо поддаются количественной оценке, а последние имеют большую неопределенность [15]. Для оценки величины смыва почв в настоящее время применяются различные методы – расчетные, полевые. Ряд методов использован исследователями и для определения смыва почв со склонов пашни южных административных районов Томской области, но полученные данные противоречивы. Так, В.Е. Мусохранов отнес исследуемый район к подзоне среднего смыва и среднего размыва – от 5 до 7–10 т/га [26]. Согласно З.В. Пацукевич и др., расчетная интенсивность смыва почв на пашне юга Томской области изменяется от 1,6 до 3,0 т/га в год [27].



Рис. 3. Порожистое микрорусло на склоне пашни юго-востока Томской области (фото М.А. Каширо, апрель 2021)

Fig. 3. Porous world channel on the slope of arable land in the south-east of the Tomsk region (photo by M.A. Kashiro, April 2021)

В.М. Хмелев и др. отмечают, что водно-эрозийные процессы наиболее развиты на пашнях Томского, Асиновского, Зырянского, Молчановского и Чаинского районов Томской области [25]. Это связано как с низкой противоэрозийной устойчивостью почв при ежегодной вспашке, так и с приуроченностью пашни к склоновым поверхностям. Смыв почв при снеготаянии на южных склонах пашни Томского района в зависимости от крутизны склонов достигает 30–70 м³/га, на северных – 5–15 м³/га.

З.П. Кирюхиной и др. на основе расчетов интенсивности эрозии для талой и ливневой эрозии по программе «EROSION» С.Ф. Краснова определена масса смытой почвы с пашни для ряда регионов РФ за 1980 и 2012 гг. В Томской области в 1980 г. с пашни площадью 671,1 тыс. га было смыто 1946 тыс. т. почвы; в 2012 г. – с пашни площадью 429,8 тыс. га – 1418 тыс. т. почвы. Анализ данных З.П. Кирюхиной и др. показывает, что в среднем с 1 га пашни в 1980 г. смывалось 2–3 т/га в год от стока талых и ливневых вод, а в 2012 г. – 3–4 т/га [28]. По данным наших полевых наблюдений смыв почвы талыми снеговыми водами весной 2012 г. был более значителен и изменялся на склонах пашни южной экспозиции от 2–5 до 56 м³/га в зависимости от крутизны, длины, микрорельефа, запасов влаги в СП и агрофона.

Авторами данной работы для оценки интенсивности смыва почвы со склонов пашни использованы расчетные методы, а также многолетние комплексные полевые исследования эрозии почв на ключевых участках «Лесопитомник» (район п. Басандайка, 1985–2005 гг.); «10 км» (район трассы Томск–Ярское, 1985–2020 гг.); «Лучаново» (в 20 км к юго-востоку от

г. Томска, 1988–2021 гг.). Кроме того, проводились маршрутные обследования пашни после снеготаяния в южных районах Томской области: Томском, Асиновском, Зырянском, Кожевниковском и Первомайском.

Ежегодно в конце марта на ключевом участке «Лучаново» проводятся в зависимости от микрорельефа замеры толщины снега через 10–20 м по ландшафтно-геоморфологическим профилям; измеряются скорости воды в струйчатых размывах во время снеготаяния; осуществляется забор проб воды на основные органолептические показатели (прозрачность, мутность, цвет); определяется глубина, на которую оттаивает почва. После того как снег сходит с большей части агроландшафтов, осуществляется обследование струйчатых размывов с замерами через 1–10 м с учетом их извилистости, конусов выноса, отбираются пробы делювия и почв на гранулометрический, химический состав [17, 20, 21].

Для Томь-Яйского междуречья построена карта средних углов наклона земной поверхности (1:100000), составлены цифровые модели рельефа для бассейна р. Басандайка в масштабе 1:50000, на ключевой участок «Лучаново» в масштабе 1:25000.

Результаты исследования

Результаты расчетных данных по величине смыва почв талыми снеговыми водами. Величина смыва почв талыми снеговыми водами по данным расчетных методов произведена по эмпирическим зависимостям Г.А. Ларионова [5] и по региональной методике Д.А. Буракова и др. [29]. Согласно зависимости Г.А. Ларионова, смыв почвы талыми водами с пашни

Томь-Яйского междуречья достигает 8,2–13,8 т/га в год. Наиболее интенсивно эрозия проявляется на склоновых землях западной и центральной частей названного междуречья.

Расчеты средней величины смыва почв по региональной методике Д.А. Буракова и др. показали, что среднемноголетние значения модуля смыва почв колеблются в диапазоне от 4,0 на склонах северной экспозиции до 9,4 м³/га на склонах южной экспозиции, коэффициенты изменчивости очень высоки – 0,68–1,01, соотношение коэффициентов асимметрии и вариации – 1–3. Модули смыва почв, превышающие ежегодные значения один раз в n=100 лет, составляют 40,7–64,9 м³/год.

Согласно расчетным данным на исследуемой территории интенсивность плоскостной эрозии по СП 115.1330.2016 [30] составляет от 2–5 м³/га в год (умеренно опасная) до 5–10 м³/га (опасная), а в отдельные годы развивается опасный процесс – 10–15 м³/га и более.

Данные о среднемноголетних модулях смыва почв, полученные расчетными методами, не отражают реальной картины эрозионных процессов, происходящих на склонах пашни во время снеготаяния. Это положение подтверждается многолетними (1985–2021 гг.) наблюдениями в пределах ключевых участков и при маршрутных обследованиях пашни.

Результаты полевых наблюдений за 36-летний период (1985–2021 гг.) показали, что, смыв почв на склонах пашни может сильно различаться в пространстве. Наиболее интенсивен смыв почвы со склонов южной экспозиции по боронованной зяби, изменяющийся от 3–8 до 25–80 м³/га, а по стерне, всходам озимых, грубой зяби поперек склона – от 0,5–1,0 до 3–5 м³/га. Также на величину смыва оказывает влияние уклон поверхности. Так, наибольший смыв почв на склонах пашни южной экспозиции наблюдается по зяби при уклоне земной поверхности 5–7° и более, достигая 30–80 м³/га за снеготаяние, а также в районе лесополос, особенно в годы с бурным таянием сугробов. В последних скапливаются большие запасы влаги (до 300–400 мм и более). В результате на пашне образуются промоины глубиной 1–1,3 м, а скорость течения воды в них достигает 1–1,5 м/с.

По методике Д.А. Буракова и др. [29] проведены расчеты по оценке вероятностей ежегодного превышения модуля смыва почв с пашни ключевого участка вблизи с. Лучаново за 1988–2021 гг. и установлено, что со склонов пашни южных экспозиций в среднем смывается до 9 м³/га почвы, а со склонов северной экспозиции – 4 м³/га. На склонах пашни северной экспозиции смыв почв меньше и в среднем за годы наблюдения составляет 1–5 м³/га, но в годы с длительным снеготаянием достигает 20–25 м³/га. В табл. 2 приведены примеры смыва почв со склонов разной экспозиции по ряду лет.

В результате делювиального процесса происходит перемещение значительного объема литомасс от приводораздельных поверхностей к подножию склонов (рис. 4). Наши наблюдения показали справедливость выводов Л.Ф. Литвина [6] о сложности проявления делювиального процесса в агроландшафтах:

поскольку происходит перемещение литомасс не только в продольном плане – от водораздела к близлежащей речной долине или балке, но наблюдается и поперечная дифференцированность процессов смыва, размыва и аккумуляции. Это обусловлено расчленением склонов пашни сетью потяжин, ложбин. Кроме того, значительное влияние оказывают микро- и нанорельеф пашни, например, наличие суффозионно-просадочных западин. Гранулометрический состав делювия в местах аккумуляции характеризуется несколько большим содержанием песка и ила по сравнению с почвами плакоров (табл. 3).

В составе делювия, отложившегося на разных участках склона, содержится значительное количество гумуса – от 0,99 до 6,1 %, достигая в отдельных пробах до 7,8 %, а также других биогенов (табл. 3). В.А. Хмелев и др. отмечают, что ежегодные потери гумуса для темно-серых оподзоленных почв составляют 0,43 т/га; для серых оподзоленных – 0,62 т/га; для светло-серых оподзоленных – 0,43 т/га; дерново-подзолистых – 0,15 т/га; черноземов – 0,98 т/га в год [25].

Таблица 2. Примеры средних данных по смыву почв исследуемых участков

Table 2. Examples of mean data on soil washout of the surveyed areas

Год и место наблюдения Year and place of research	Экспозиция склона, агроландшафт Slope exposure, agricultural landscape	Смыв, м ³ /га Soil washout, m ³ /ha
2003, «10 км» «10 km»	Южная, контурная зябь South, contour plowland	15–16
2003, Лучаново Luchanovo	Южная, зябь боронованная South, harrowed plowland	13–14
2004, «10 км» «10 km»	Южная, зябь South, plowland	20–21
2004, Асиновский район (Михайловка) Asino district (Mikhailovka)	Южная, зябь боронованная вдоль склона South, harrowed plowland along the slope	37–40
2004, Томский район (Семилузжы) Tomsk district (Semiluzhki)	Северная, контурная зябь Northern, contour plowland	27–28
2004, Асиновский район (Большедорохово) Asino district (Bolshedorokhovo)	Южная, стерня South, stubble	0,5–1,0
2004, Кожевниковский район Kozhevnikovsky district	Контурная зябь Harrowed plowland	2–5
2010, Лучаново Luchanovo	Южная, всходы клевера South, clover shoots	4–5
	Южная, боронованная зябь вдоль склона South, harrowed plowland along the slope	29–30
	Северная, боронованная зябь North harrowed chill	9–15

Наши 34-летние наблюдения за эрозией почв при снеготаянии на пашне южной части территории Томской области показали, что согласно СП 115.1330.2016 [30], в более чем 56 % случаев развивается опасный и весьма опасный делювиальный процесс, приводящий к снижению плодородия почв.



Рис. 4. Делювиальный шлейф на склоне агроландшафта Томского района (фото З.Н. Квасниковой, апрель 2012)

Fig. 4. Deluvial fan on the slope of the agricultural landscape of the Tomsk region (photo by Z.N. Kvasnikova, April 2012)

Таблица 3. Гранулометрический состав и содержание некоторых биогенов в делювиальных отложениях и почвах (верхний горизонт) пашни Лучановского ключевого участка

Table 3. Granulometric composition and content of some nutrients as part of deluvial deposits and soil (upper horizon) of the arable land of the Luchanovsky key site

Тип отложений Sediment type	Гранулометрический состав, % Granulometric composition, %			Содержание биогенов Nutrient content		
	Песок Sand	Пыль Silt	Глина Clay	Гумус Humus, %	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	P ₂ O ₅ подвиж./labile, мг/mg 100 г/g
Почвы плакоров Plakor soils	15,8–16,7	64,6–68,2	16,0–18,9	5,4–6,2	28,7–30,5	71,8–82,3
Делювий/Deluvium	6,6–26,0	50,0–72,3	14,4–32,0	2,6–6,1	21,2–28,5	70,3–82,6

Заключение

Сельскохозяйственные угодья (пашни) юга Томской области, расположенные на склоновых землях, эрозионноопасны, но в разной степени, зависящей от их крутизны, длины, формы, экспозиции, а также от состояния агрофона. Среднегодовой смыв со склонов пашни южной экспозиции за 34-летний период наблюдений по зяби варьировал в зависимости от интенсивности снеготаяния от 0,5...2,0 м/га при глубокой (20–25 см) вспашке поперек склона, от 2–5 до 16–30 м³/га при боронованной поперек склона зяби, местами на склонах 5–7 и более до 50–80 м³/га; на склонах пашни северной экспозиции смыв меньше – от 1 до 8 м³/га, лишь в годы с длительным периодом снеготаяния достигал 15–25 м³/га (1989, 2010 гг.).

Согласно расчетным данным среднееголетние значения модуля смыва колеблются в диапазоне 4,0–9,4 м³/га. Различия в оценках смыва почв, полученных разными методами, объясняются тем, что все методы не лишены недостатков и требуют усовершенствования. В расчетах не учитывается неравномерность залегания снежного покрова, микрорельеф, наличие лесополос, форма склонов и др.

Исследования транзита и аккумуляции рыхлых отложений, формирующихся в результате смыва талыми снеговыми водами, показывают, что большая часть делювия остается в нижней части не распаиваемых склонов пашни, днища балок и не достигает русел малых рек и ручьев изучаемого региона.

Данные об интенсивности смыва почв, полученные авторами статьи, – это основа для представления о процессах развития эрозии почв от стока талых снеговых вод в агроландшафтах юга Томской области и для разработки мер борьбы с ней. При этом необходимо помнить, что полученные нами данные, как и материалы других авторов, не учитывают механической эрозии – перемещения почвы орудиями обработки при распашке и выноса почвенных частиц совместно с урожаем, особенно при уборке корнеплодов.

Кроме того, эрозия почв как рельефообразующий процесс имеет большое социально-экономическое и экологическое значение: происходит деградация почв, теряется их плодородие, в перемещаемых почвогрунтах содержатся различные химические элементы, способные привести к загрязнению окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *Environment International*. – 2003. – V. 29 (4). – P. 437–450.
2. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.С. Современные проблемы эрозии почв. – Белгород: Константа, 2012. – 456 с.
3. Эрозия – актуальная проблема деградации почв // *ГлавАгроном*. – 2020. URL: <https://glavagronom.ru/articles/eroziya--aktualnaya-problema-degradacii-pochv> (дата обращения: 13.12.2021).
4. A linkage between the biophysical and the economic: assessing the global market impacts of soil erosion / M. Sartori, G. Philippidis, E. Ferrari, P. Borrelli, E. Lugato, L. Montanarella, P. Panagos // *Land Use Policy*. – 2019. – V. 86. – P. 299–312.
5. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности, количественная оценка. – М.: Изд-во Московского университета, 1993. – 200 с.
6. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 255 с.
7. Arshad M.A., Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems // *Agric Ecosyst Environ*. – 2002. – V. 88 (2). – P. 153–160.
8. World's soils are under threat / L. Montanarella, D.J. Pennock, N. McKenzie, M. Badraoui, V. Chude, I. Baptista, T. Mamo, M. Yemefack, M. Singh Aulakh, K. Yagi, S. Young Hong, P. Vijarnsom, G.L. Zhang, D. Arrouays, H. Black, P. Krasilnikov, J. Sobocká, J. Alegre, C.R. Henriquez, M. de Lourdes Mendonça-Santos, M. Taboada, D. Espinosa-Victoria, A. Al Shankitii, S.K. Alavi Panah, E.A.E.M. Elsheikh, J. Hempel, M. Camps Arbestain, F. Nachtergaele, R. Vargas // *Soil*. – 2016. – V. 2. – P. 79–82.
9. Morgan R.P.C. Soil erosion and its control (Van Nostrand Reinhold soil science series). – Hardcover, January 1, 1986. – 311 p.
10. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE) / K.G. Renard, G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder. – U.S.: Department of Agriculture, 1997. – *Agriculture Handbook* № 703. – 404 p.
11. Nearing M.A. Impacts of climate change on erosivity in the United States: 2000–2050 // *Soil Erosion Research for the 21st Century*. Proc. of the International Symposium. – Honolulu, HI, USA, 3–5 January 2001. – P. 268–270.
12. Barry R.G. Cryosphere Models // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. by R. Meyers. – New York: SpringerScience + BusinessMedia, LLC, 2009. – P. 1704–1718.
13. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data / O. Cerdan, G. Govers, Y. le Bissonnais, K. van Oost, J. Poesen, N. Saby, A. Gobin, A. Vacca, J. Quinton, K. Auerswald, A. Klik, F.J.P.M. Kwaad, D. Raclot, I. Ionita, J. Rejman, S. Rousseva, T. Muxart, M.J. Roxo, T. Dostal // *Geomorphology*. – 2010. – V. 122 (1–2). – P. 167–177.
14. Вариабельность факторов и количественные оценки эрозии / Л.Ф. Литвин, Н.Г. Добровольская, З.П. Кирюхина, С.Ф. Краснов // Двадцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Пермь, 8–10 октября 2013. – Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – С. 129–131.
15. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records / P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger, B. Yu, A. Klik, K. Jae Lim, J.E. Yang, J. Ni, C. Miao, N. Chattopadhyay, S. Hamidreza Sadeghi, Z. Hazbavi, M. Zabih, G.A. Lariionov, S.F. Krasnov, A.V. Gorobets, Y. Levi, G. Erpul, C. Birkel, N. Hoyos, V. Naipal, P. Tarso S. Oliveira, C.A. Bonilla, M. Meddi, W. Nel, H. Al Dashti, M. Boni, N. Diodato, K. van Oost, M. Nearing, C. Ballabio // *Scientific Reports*. – 2017. – № 7:4175.
16. Wuepper D., Borrelli P., Finger R. Countries and the global rate of soil erosion // *Nature Sustainability*. – 2020. – V. 3. – P. 51–55.
17. Osintseva N.V., Kvasnikova Z.N., Evseeva N.S. The risk of occurrence of erosion processes on the western slope of the Tom'-Yaya interfluvium // *Geography and Natural Resources*. – 2014. – V. 35. – № 2. – P. 152–156.
18. Строчкова Л.А. Состав и свойства покровных отложений Томского Приобья // *Обский вестник*. – 1999. – № 1–2. – С. 122–127.
19. Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Юркова К.Д. Географические особенности г. Томска и динамика сезонных ритмов в условиях глобального изменения климата. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2021. – 254 с.
20. Влияние рельефа и растительности на распределение снежного покрова в бассейнах малых рек / Н.С. Евсеева, А.И. Петров, М.А. Каширо, З.Н. Квасникова, А.С. Батманова, А.В. Хон // *Геосферные исследования*. – 2017. – № 4. – С. 64–74.
21. Снеговетровые процессы в агроландшафтах бассейнов малых рек юго-востока зоны подтайги Западно-Сибирской равнины / Н.С. Евсеева, М.А. Каширо, З.Н. Квасникова, А.С. Батманова, А.И. Петров, М.А. Волкова, О.В. Носырева // *География и природные ресурсы*. – 2020. – № 1 (160). – С. 113–121.
22. Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А. Из истории изучения мерзлоты юго-востока Западной Сибири, ее типы и влияние на рельефообразование // *Геосферные исследования*. – 2018. – № 3. – С. 71–87.
23. Носырева О.В., Соян Д.А. Снежный покров как фактор развития эрозии почв на юге Томской области // *Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – Томск, 2017. – С. 311–315.
24. Тимофеев А.Ф. Особенности защиты почв от водной эрозии в Нечерноземной зоне // *Земледелие*. – 2003. – № 3. – С. 12–13.
25. Агроэкологические основы землепользования в Томской области / В.А. Хмелев, В.К. Каличкин, В.Г. Азаренко, Н.Н. Шипилин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 255 с.
26. Мусохранов В.Е. Использование эродированных земель в Западной Сибири. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 191 с.
27. Пацукевич З.В., Кирюхина З.П. Эродируемость пахотных почв России // *Вестник МГУ. Серия географическая*. – 2001. – № 3. – С. 39–43.
28. Современный тренд земледельческой эрозии почв Уральского и Западно-Сибирского регионов / З.П. Кирюхина, Н.Г. Добровольская, С.Ф. Краснов, Л.Ф. Литвин // *Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных условиях*. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – С. 242–244.
29. Бураков Д.А., Маркова Е.Э. Эрозия почв. – Красноярск: Красноярский гос. аграр. ун-т, 2009. – 160 с.
30. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция. – М.: Стандартинформ, 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202> (дата обращения: 07.12.2021).

Поступила: 20.10.2021 г.

Информация об авторах

Евсеева Н.С., доктор географических наук, заведующая кафедрой географии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Петров А.И., старший преподаватель кафедры гидрологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Квасникова З.Н., кандидат географических наук, доцент кафедры географии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Каширо М.А., кандидат географических наук, доцент кафедры географии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Хон А.В., кандидат географических наук, доцент кафедры географии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета; младший научный сотрудник лаборатории самоорганизации геосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

UDC 551.4.042+551.4.022

SOIL EROSION DURING SNOWMELTING IN AGRICULTURAL LANDSCAPES OF THE SOUTH OF THE TOMSK REGION: DEVELOPMENT FACTORS, INTENSITY AND DYNAMICS

Nina S. Evseeva¹,
nseeva@yandex.ru

Anatoly I. Petrov¹,
petrov.anatoliy1945@yandex.ru

Zoya N. Kvasnikova¹,
zoykwas@rambler.ru

Margarita A. Kashiro¹,
mkashiro@yandex.ru

Alexey V. Khon^{1,2},
avkhon@yandex.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
10/3, Akademicheskoye avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance. Water erosion of soil is one of the priority environmental and economic problems of our time. This is due to the fact that soil is a limited resource, required for food production, carbon sequestration, regulation of water and nutrients, filtering pollutants, increasing biodiversity etc. Zonal soil types are degrading constantly as a result of population growth, deforestation, increase in arable land and climate change. Although water erosion is one of the most serious causes of soil degradation, global patterns of erosion activity are still difficult to quantify. Various calculation and field measurements methods are currently used to assess the magnitude of soil washout. The data on soil washout from the slopes of arable land in the southern part of the Tomsk region, obtained by the various authors using different methods, are contradictory.

The main aim: a brief overview of the factors in the development of soil erosion during snowmelt, assessment of the intensity and dynamics of erosion based on long-term field observations on arable land in the southern administrative districts of the Tomsk region and calculation methods.

Objects: agricultural land (arable land) in the southeast of the Tomsk region.

Methods: field measurements, computational method, laboratory and analytical methods.

Results. Our observations have shown that the erosion hazard of agricultural land in the southeast of the Tomsk region is caused by a complex of interrelated natural and anthropogenic factors such as relief, underlying rocks and soils, climatic indicators, and land cultivation methods. The average annual washout from the slopes of arable land in the region over a 34-year observation period varies from 2–5 to 16–30 m³/ha per snowmelt, sometimes washout measure up to 50–80 m³/ha. According to the calculated data, the mean annual values of the flush modulus fluctuate in the range of 4.0–9.4 m³/ha. Differences in soil washout assessments are explained by the imperfections of various methods that require improvement. The calculations do not take into account the uneven occurrence of the snow cover, microrelief, the presence of forest belts, and the shape of the slopes.

Key words:

Water erosion, snowmelting, arable land, development factors of soil erosion, Tomsk region.

REFERENCES

- Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, vol. 29 (4), pp. 437–450.
- Lisetskiy F.N., Svetlichny A.A., Cherny S.S. *Sovremennyye problemy eroziovedeniya* [Modern problems of erosion studies]. Belgorod, Konstanta Publ., 2012. 456 p.
- Eroziya – aktualnaya problema degradatsii pochv [Erosion is the urgent problem of soil degradation]. *GlavAgronom*, 2020. Available at: <https://glavagronom.ru/articles/eroziya--aktualnaya-problema-degradatsii-pochv> (accessed 13 December 2021).
- Sartori M., Philippidis G., Ferrari E., Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Panagos P. A linkage between the biophysical and the economic: assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy*, 2019, vol. 86, pp. 299–312.
- Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti, kolichestvennaya otsenka* [Erosion and deflation of soils: basic patterns of quantitative assessment]. Moscow, Moscow University Publ. House, 1993. 200 p.
- Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv selskokhozyaystvennykh zemel Rossii* [Geography of soil erosion of agricultural lands in Russia]. Moscow, Akademkniga Publ., 2002. 255 p.
- Arshad M.A., Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric Ecosyst Environ*, 2002, vol. 88 (2), pp. 153–160.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsom P., Zhang G.L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., de Lourdes Mendonça-Santos M., Taboada M., Espinosa-Victoria D., Al Shankiti A., Alavi Panah S.K., Elsheikh E.A.E.M., Hempel J., Camps Arbertain M., Nachtergaele F., Vargas R. World's soils are under threat. *Soil*, 2016, vol. 2, pp. 79–82.
- Morgan R.P.C. *Soil erosion and its control* (Van Nostrand Reinhold soil science series). Hardcover, January 1, 1986. 311 p.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning*

- with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). U.S., Department of Agriculture, 1997. Agriculture Handbook no. 703, 404 p.
11. Nearing M.A. Impacts of climate change on erosivity in the United States: 2000–2050. *Soil Erosion Research for the 21st Century. Proc. of the International Symposium*. Honolulu, HI, USA, 3–5 January 2001. pp. 268–270.
 12. Barry R.G. Cryosphere models. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Ed. by R. Meyers. New York, Springer Science + BusinessMedia, LLC, 2009. pp. 1704–1718.
 13. Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N., Gobin A., Vacca A., Quinton J., Auerswald K., Klik A., Kwaad F.J.P.M., Raclot D., Ionita I., Rejman J., Rousseva S., Muxart T., Roxo M.J., Dostal T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 2010, vol. 122 (1–2), pp. 167–177.
 14. Litvin L.F., Dobrovolskaya N.G., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F. Variablenost faktorov i kolichestvennyye otsenki erozii [Variability of factors and quantitative estimates of erosion]. *Dvadsat vosmoe plenarnoe mezhdunarodnoye koordinatsionnoye soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ustevykh protsessov* [Twenty-eighth plenary interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, channel and estuarine processes]. Perm, October 8–10, 2013. Perm, Perm State National Research University Publ., 2013. pp. 129–131.
 15. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Jae Lim K., Yang J.E., Ni J., Miao C., Chattopadhyay N., Hamidreza Sadeghi S., Hazbavi Z., Zabihi M., Lariou G.A., Krasnov S.F., Gorobets A.V., Levi Y., Erpul G., Birkel C., Hoyos N., Naipal V., Tarso P., Oliveira S., Bonilla C.A., Meddi M., Nel W., Al Dashti H., Boni M., Diodato N., Van Oost K., Nearing M., Ballabio C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 2017, no. 7: 4175.
 16. Wuepper D., Borrelli P., Finger R. Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, 2020, vol. 3, pp. 51–55.
 17. Osintseva N.V., Kvasnikova Z.N., Evseeva N.S. The risk of occurrence of erosion processes on the western slope of the Tom'-Yaya interfluvium. *Geography and Natural Resources*, 2014, vol. 35, no. 2, pp. 152–156.
 18. Strokova L.A. Composition and properties of cover sediments of the Tomsk Ob region. *Obshch. Bulletin*, 1999, no. 1–2, pp. 122–127. In Rus.
 19. Filandysheva L.B., Romashova T.V., Yurkova K.D. *Geograficheskie osobennosti g. Tomsk i dinamika sezonnykh ritmov v usloviyakh globalnogo izmeneniya klimata* [Geographic features of Tomsk and the dynamics of seasonal rhythms in the context of global climate change]. Tomsk, Tomsk State University Publ. House, 2021. 254 p.
 20. Evseyeva N.S., Petrov A.I., Kashiro M.A., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Khon A.V. The influence of relief and vegetation on the distribution of snow cover in the basins of small rivers. *Geosphere research*, 2017, no. 4, pp. 64–74. In Rus.
 21. Evseyeva N.S., Kashiro M.A., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Petrov A.I., Volkova M.A., Nasyreva O.V. Wind-driven snow processes in agrolandscapes of small river basins in the southeastern subtaiga zone of the west Siberian plain. *Geography and Natural Resources*, 2020, no. 1 (160), pp. 113–121. In Rus.
 22. Evseyeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A. From the history of the study of permafrost in the southeast of Western Siberia, its types and impact on relief formation. *Geosphere research*, 2018, no. 3, pp. 71–87. In Rus.
 23. Nasyreva O.V., Soyana D.A. Snezhnyy pokrov kak faktor razvitiya erozii pochv na yuge Tomskoy oblasti [Snow cover as a factor in the development of soil erosion in the south of the Tomsk region]. *Sovremennyye problemy geografii i geologii. K 100-letiyu otkrytiya estestvennogo otdeleniya v Tomskom gosudarstvennom universitete. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of geography and geology. To the 100th anniversary of the opening of the natural department at Tomsk State University. Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Tomsk, 2017. pp. 311–315.
 24. Timofeev A.F. Features of soil protection from water erosion in the Non-Chernozem zone. *Agriculture*, 2003, no. 3, pp. 12–13. In Rus.
 25. Khmelev V.A., Kalichkin V.K., Azarenko V.G., Shipilin N.N. *Agroekologicheskie osnovy zemlepolzovaniya v Tomskoy oblasti* [Agri-environmental bases of land use in the Tomsk region]. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences Siberian Branch Publ., 2001. 255 p.
 26. Musokhranov V.E. *Ispolzovanie erodirovannykh zemel v Zapadnoy Sibiri* [Use of eroded land in Western Siberia]. Moscow, Rosselkhozizdat Publ., 1983. 191 p.
 27. Patsukevich Z.V., Kiryukhina Z.P. Erodibility of arable soils in Russia. *Moscow State University Bulletin. Geographic series*, 2001, no. 3, pp. 39–43. In Rus.
 28. Kiryukhina Z.P., Dobrovolskaya N.G., Krasnov S.F., Litvin L.F. Sovremennyy trend zemledelcheskoy erozii pochv Uralskogo i Zapadno-Sibirskogo regionov [Modern trend of agricultural soil erosion in the Ural and West Siberian regions]. *Zakonomernosti proyavleniya erozionnykh i ruslovykh protsessov v razlichnykh usloviyakh* [Patterns of manifestation of erosion and channel processes in different conditions]. Moscow, LENAND Publ., 2019. pp. 242–244.
 29. Burakov D.A., Markova E.E. *Eroziya pochv* [Soil erosion]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Agrarian University Publ., 2009. 160 p.
 30. SP 115.13330.2016. *Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystviy* [Geophysics of Hazardous Natural Impacts]. Moscow, Standartinform Publ. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054202> (accessed 7 December 2021).

Received: 20 October 2021.

Information about the authors

Nina S. Evseeva, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

Anatoly I. Petrov, senior lecturer, National Research Tomsk State University.

Zoya N. Kvasnikova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Margarita A. Kashiro, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Alexey V. Khon, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University; junior research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.