

ГЕОГРАФИЯ

УДК 631.459.2:551.435.84

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-45-56>

Научная оригинальная статья

**СУФФОЗИОННО-ПРОСАДОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ
НА МИКРОРЕЛЬЕФ И РАЗВИТИЕ ТАЛОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ ПАШНИ
ЮГО-ВОСТОКА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ***Н. С. Евсеева, З. Н. Квасникова*, М. А. Каширо, В. Ю. Зайцева*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Российская Федерация

*zoi kwas@rambler.ru

Аннотация. В статье представлены результаты многолетних исследований сопряженного воздействия суффозионных процессов на развитие эрозии почв агроландшафтов. Основной целью данной работы является анализ роли суффозионно-просадочных процессов в развитии эрозии почв от стока талых снеговых вод и трансформации микрорельефа пашни юго-востока Томской области. Материалами послужили результаты маршрутных обследований пашни южных районов региона в течение тридцати лет, а также полустационарные наблюдения на ключевых участках «10 км» (2003–2014 гг.) и «Лучаново» (1988–2026 гг.), где проводились ежегодные микромасштабные снегосъемки, замеры скорости струйчатых потоков и мутности воды, отбор проб делювия. При анализе использовались картографический, гранулометрический методы, дешифрирование космических снимков и географических информационных систем (ГИС). В результате установлено три вида влияния суффозионных процессов на талую эрозию: смыв почв со склонов депрессии на ее днище, перелив талых вод из одной депрессии в другую, расположенную гипсометрически ниже с перемещением литомасс, а также прорыв воды через борта котловин на прилегающие участки пашни. Кроме того, зафиксированы современные проявления внешней суффозии в виде просадок грунта на склонах агроландшафтов и возрождения погребенных оврагов. Полученные данные о масштабах перемещения твердого материала помогут скорректировать существующие методики расчета потерь почвы и разработать противоэрозионные мероприятия по защите пахотных угодий юго-востока Томской области, а выявленная роль депрессий как геохимических барьеров открывает перспективы для изучения локальных циклов миграции питательных элементов в агроландшафтах.

Ключевые слова: водная эрозия, суффозионно-просадочные процессы, пашня, микрорельеф, агроландшафты, Томская область, Западно-Сибирская равнина

Для цитирования: Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Зайцева В.Ю. Суффозионно-просадочные процессы и их влияние на микрорельеф и развитие талой эрозии почв пашни юго-востока Томской области. *Вестник СВФУ*. 2026;(3): 45-56. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-45-56

SUFFOSSION-SUBSIDENCE PROCESSES AND THEIR INFLUENCE ON THE MICRORELIEF AND DEVELOPMENT OF THAW SOIL EROSION OF ARABLE LANDS IN THE SOUTHEAST OF TOMSK REGION

Nina S. Evseeva, Zoia N. Kvasnikova, Margarita A. Kashiro, Varvara Yu. Zaitseva*

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

*zjkw@rambler.ru

Abstract. This article presents the results of a long-term study of the combined effects of suffusion processes on the development of soil erosion in agricultural landscapes. The primary objective of this study is to analyze the role of suffusion-subsidence processes in the development of soil erosion from snowmelt runoff and the transformation of the microrelief of arable land in the southeast of the Tomsk region. The materials used are the results of route surveys of arable land in the southern regions of the region over a period of thirty years, as well as semi-permanent observations at key sites “10 km” (2003–2014) and “Luchanovo” (1988–2026). Cartographic and granulometric methods, as well as the interpretation of satellite images and geographic information systems (GIS), were used in the analysis. As a result, three types of influence of suffusion processes on meltwater erosion were identified: soil loss from depression slopes to their bottoms, meltwater overflow from one depression to another located hypsometrically lower, transporting lithomas, and water breaking through the sides of basins into adjacent cropland. Modern manifestations of external suffusion were recorded, including soil subsidence on the slopes of agricultural landscapes and the reactivation of buried gullies. The obtained data on the scale of solid material movement will help refine existing methods for calculating soil loss and develop anti-erosion measures to protect cropland in the southeastern Tomsk region. The identified role of depressions as geochemical barriers opens up new opportunities for studying nutrient migration in agricultural landscapes.

Keywords: water erosion, suffusion-subsidence processes, arable land, microrelief, agricultural landscapes, Tomsk Oblast, West Siberian Plain

For citation: Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Zaitseva V.Yu. Suffusion-subsidence processes and their influence on the development of thawed soil erosion and microrelief of arable land in the southeast of Tomsk region. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(3): 45-56. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-45-56

Введение

Деградация почвенного покрова является одной из глобальных экологических проблем, поскольку почвы играют важнейшую роль в выполнении основных геосферных функций, среди которых поддержание жизнедеятельности и биоразнообразия, регуляция гидросферы, климата и атмосферы, в том числе депонирование углерода; участие в биогеохимических циклах. Кроме того, почвы служат основой, обеспечивающей экосистемные услуги и ресурсы [1], используемые человеком. Эрозия почв, в том числе водная, играет значимую роль в снижении плодородия обрабатываемых земель многих стран мира, в том числе и в России. Вследствие этого проблема охраны почв от водной эрозии становится все более актуальной, а ученые изучают факторы, механизмы ее развития; разрабатывают методы оценки интенсивности проявления процесса как в нашей стране [2-5], так и за рубежом [6-9]. До настоящего времени недостаточно изучено сопряженное воздействие на почвы агроландшафтов многих процессов рельефообразования и их влияние на развитие водной эрозии в том числе и суффозионно-просадочных процессов. Многолетние полевые наблюдения авторов показали, что суффозия и просадки оказывают существенное влияние на развитие делювиальных процессов на пашне сельскохозяйственных ландшафтов южных районов Томской области и ее микрорельеф.

Цель данной работы – анализ роли суффозионно-просадочных процессов в развитии эрозии почв от стока талых снеговых вод и трансформации рельефа пашни на примере агроландшафтов юго-востока Томской области Западно-Сибирской равнины.

Объект, материал и методы исследования

В основу данной работы положены результаты маршрутных обследований пашни южных районов Томской области в течение тридцати лет, а также полустационарные наблюдения на двух ключевых участках Томского административного района – «10 км» (2003–2014 гг.) и «Лучаново» (1988–2026 гг.) (рис. 1). Ключевые участки расположены в бассейне р. Басандайка,

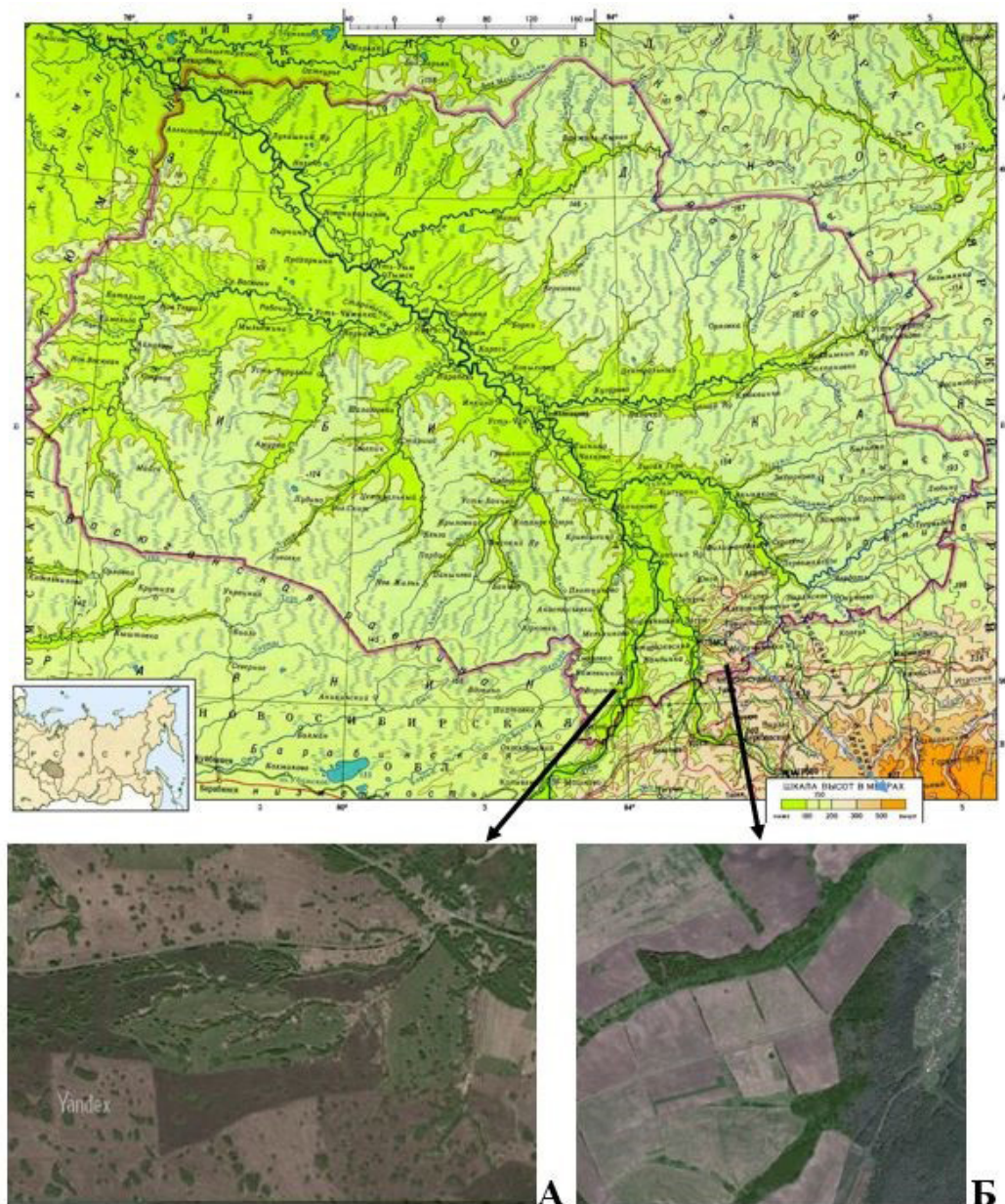


Рис. 1. Исследуемые районы на территории Томской области: А) заросшие суффозионные депрессии агроландшафтов Кожевниковского района; Б) Лучановский ключевой участок в пределах Томского района

Fig. 1. The studied areas in Tomsk region: A) overgrown suffusion depressions of agricultural landscapes of the Kozhevnikovsky district; B) the Luchanovsky key site within Tomsk region

где авторами проводятся ежегодные снегосъемки, определяются запасы воды в снеге, рассчитывается интенсивность снеготаяния, замеряются скорости воды в струйчатых потоках и ее мутность. После схода снежного покрова производится обмер струйчатых размывов через 1–10 м в зависимости от извилистости микрорусла, суффозионно-просадочных депрессий, отбираются пробы делювия в конусах выноса. При проведении исследований используются картографический, гранулометрический, аналитический методы, методы дешифрирования космических снимков и геоинформационных технологий.

Абсолютные высоты территории юго-восточной части Томской области, где расположены основные площади сельскохозяйственных угодий, колеблются от 100 до 270 м. Исследуемый район характеризуется достаточно расчлененным рельефом – от 0,3–0,6 км/км² до 0,6–1,25 км/км², относительные высоты в основном изменяются от 0–10 м до 20–40 м.

Наиболее возвышенным участком является Томь-Яйское междуречье, где относительные высоты достигают 60–80 м. Крутизна склонов пашни варьирует от 0–1° до 10–15°.

Климат территории умеренно-континентальный, средняя температура января изменяется от –17° до –20°, а июля – от 17° до 19°. Среднегодовое количество осадков по данным метеостанций южных районов колеблется по годам и по территории от 340 до 745 мм/год; до 70 % осадков за год выпадает в течение апреля-октября [10]. Толщина снежного покрова составляет 40–70 см, но в зависимости от микрорельефа пашни она изменчива: от 0–30 см на наветренных и возвышенных участках пашни до 1–2 м у лесополос и депрессиях рельефа [11]. Глубина промерзания почв варьирует от 23 до 108 см [12].

Характерной особенностью территории исследования является развитие сплошного покрова аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений четвертичного возраста, мощность которых достигает десятков метров. Верхнюю часть этой толщи слагают лессовые образования. Они являются рельефообразующим комплексом отложений в разрезах различных геоморфологических элементов. Генезис их элювиально-делювиальный с привнесом эолового материала, возраст пород различен и определяется как средненеоплейстоцен-поздненеоплейстоценовый [13]. Мощность покровных отложений изменяется от 0,5–1,0 м на поверхности первой надпойменной террасы до 5–10 м на междуречьях. По гранулометрическому составу породы представлены в основном лессовидными суглинками бурыми, желто-бурыми, неслоистыми с округлыми и овальными порами, достигающими в диаметре 3–5 мм. В отложениях преобладает пылеватая фракция: в песках – 2–66 %, в супесях – 40–80 %, в суглинках – 14–88 %, в глинах – 57–69 % [14]. Породы карбонатные (содержание CaCO₃ составляет 5–7 %) карбонаты встречаются как в рассеянном виде, так и в форме стяжений. Лессовые породы являются почвообразующими, на них сформировался почвенный покров, представленный в агроландшафтах в основном серыми лесными почвами и их подтипами, черноземами, дерново-подзолистыми почвами.

Юго-восточная и южная части территории Томской области относятся к Южной области развития лессовых пород Западной Сибири, в ее пределах широко развиты суффозионно-просадочные процессы [15]. Лессовые породы исследуемой территории размокают в воде в течение 2–120 минут, редко встречаются неразмокающие [14]. Под действием внешней нагрузки и собственного веса или только собственного веса при замачивании водой они претерпевают вертикальную деформацию (просадку). Распашка земель, слабая водостойкость покровных отложений, значительное увлажнение территории, рельеф – причины развития эрозионных процессов, суффозии и просадок. В пределах исследуемой территории развита внешняя суффозия, в процессе которой материал транспортируется вниз по склону или выносятся к его подножию [15].

Вследствие развития названных процессов на поверхности междуречий, высоких террас в пределах пашни развиты овальные, округлые депрессии. Полевые обследования и дешифрирование космических снимков показали, что в среднем их количество на 1 км² составляет 2–6; глубина депрессий достигает 3–5 м, но чаще 0,5–1,5 м. Длина склонов депрессий изменяется от первых метров до 40–70 м, а крутизна склонов варьирует от 1–2° до 10–15° [16]. В ходе полевых

наблюдений авторами выявлено влияние суффозионо-просадочных форм рельефа на развитие эрозии почв от стока талых снеговых вод и на трансформацию микрорельефа пашни, а также зафиксированы современные проявления суффозии.

Обсуждение результатов

Депрессии на пашне исследуемого района подразделяются на облесенные (береза, осина, ива, сосна) и необлесенные, подвергающиеся распашке. Маршрутные исследования пашни юга и юго-востока Томской области и полустационарные наблюдения на ключевых участках позволили выявить три вида влияния депрессий на развитие талой эрозии почв: смыв почв со склонов депрессии на ее днище; перелив талых вод из одной депрессии в другую; прорыв воды из депрессии на прилегающие участки пашни.

1. Смыв почв со склонов депрессии после снеготаяния фиксируется в виде струйчатых размывов, оплывания. Смытые со склонов депрессии почвенные частицы отлагаются на днище и кольматируют почвенные поры, что вызывает застаивание воды. Вода в таких депрессиях держится от 10–15 дней до 1–1,5 месяца. В результате в глубоких депрессиях на пашне местами образуются озера (рис. 2).



Рис. 2. Депрессии, заполненные водой на пашне Лучановского ключевого участка
(фото Квасниковой З.Н., апрель 2026)

Fig. 2. Depressions filled with water on the arable land of the Luchanovsky key area
(photo by Z.N. Kvasnikova, April 2026)

Обмер русел водороев на склонах депрессии показал, что, смыв почвы в зависимости от площади депрессии, длины и крутизны ее склонов, интенсивности снеготаяния, как правило, невелик – от 0,1–0,5 м³ до 1 м³, но иногда может быть значительным. Так на склонах одной из депрессий на пашне Томского района в районе с. Белоусова нами выявлено 18 водороев с глубиной 20 см и длиной от 50 до 80 м. Площадь водосбора этой депрессии около 5000 м².

2. Более значительные перемещения объемов почвенных масс происходят при переливе талых вод из депрессии, расположенной гипсометрически выше в нижележащую. Результаты таких переливов авторы наблюдали неоднократно на пашне Яя-Кийского и Томь-Яйского междуречий. Объем перемещаемых литомасс изменяется в широком диапазоне – от 0,1–0,5 м³ до 35 м³.

Показателен в этом плане пример наблюдений на ключевом участке «Лучаново» за одной из депрессий на южном склоне пашни (см. рис. 2).

Наблюдения за поступлением делювия на днище этой депрессии в течение 1989–1994 гг. показали, что в зависимости от состояния агрофона и интенсивности снеготаяния с ее склонов крутизной от $2-3^{\circ}$ до $10-12^{\circ}$ на днище депрессии поступало от 1–3 до 12–14 м³ делювия.

В 2001 году в ходе интенсивного снеготаяния произошел прорыв вод из депрессии у дороги гипсометрически расположенной на 2–3,5 м выше. В результате образовался «канал стока», по которому ежегодно с 2001 г. происходит сток талых вод с образованием перед зарослями ивняка облесенной депрессии конусов выноса (рис. 3). Например, в 2015 году площадь конуса выноса составила 526 м², в 2019 году площадь конуса выноса была около 375 м², а толщина делювия достигала 17 см.

По данным наших наблюдений только по каналу стока в депрессию ежегодно поступает от 0,5 м³ до 34,5 м³ делювия (табл. 1). В результате таких переливов воды из одной депрессии в другую на пашне со временем образуются делли, ложбины стока, а местами овраги.



Рис. 3. Конус выноса делювия на пашне Лучановского ключевого участка
(фото Квасниковой З.Н., апрель 2012)

Fig. 3. Cone of deluvium alluvium on the arable land of the Luchanovsky key area
(photo by Z.N. Kvasnikova, April 2012)

Таблица 1

Примеры поступления делювия на днище облесенной депрессии в годы с разным агрофоном по каналу стока на Лучановском ключевом участке

Table 1

Examples of deluvium influx to the bottom of a forested depression in years with different agricultural backgrounds along the runoff channel at the Luchanovsky key site

Год наблюдения	Агрофон	Объем делювия, м³	Год наблюдения	Агрофон	Объем делювия, м³
2010	Зябь грубая	5–6	2016	Стерня	1–2
2011	Зябь боронованная	4–5	2017	Зябь грубая	0,1–0,5
2012	Зябь боронованная	4–5	2018	Стерня	Нет смыва
2013	Зябь боронованная	34,5	2022	Зябь грубая	0,5
2014	Стерня злаковых	0,5–1,0	2023	Зябь боронованная	4–5
2015	Зябь боронованная	24–25	2025	Стерня	0,5–1,0

3. Депрессии на пашне, переполняясь водой, особенно в годы интенсивного снеготаяния, способствуют перемещению почвенных масс на прилегающие участки пашни в результате прорыва воды через борта. Показателен пример вышеописанной депрессии: во время снеготаяния она переполняется водой и под напором вод, стекающих с ее склонов, происходит прорыв воды через южный склон котловины крутизной до 3–4°. Водный поток устремляется на прилегающий участок пашни с крутизной поверхности в 0,5–2°. Скорость водного потока уменьшается, часть содержащихся в нем твердых частиц осаждается на поверхность пашни с образованием локальных «полей аккумуляции» (рис. 4).



Рис. 4. Поле аккумуляции делювия на южном склоне исследуемого района (фото Квасниковой З.Н., апрель 2015)

Fig. 4. Field of colluvium accumulation on the southern slope of the study area (photo by Z.N. Kvasnikova, April 2015)

Площадь поля аккумуляции, образованного прорывом воды из описанной депрессии, за период наблюдений достигала 1450–1600 м², а толщина отложения делювия до 7–11 см. Таким образом, в годы интенсивного развития талой эрозии почв на этом поле может накапливаться до 10 м³ делювия. Это приводит к выравниванию рельефа и повышению абсолютных отметок поверхности пашни в пределах полей аккумуляции и формированию ареалов намытых почв. Кроме того, происходит процесс миграции химических элементов, биогенов, а также перераспределение и изменение гранулометрического состава почв, испытывающих аккумуляцию делювия. По данным наших исследований в делювии, поступающем со склонов депрессий на их днища и на поля аккумуляции, отмечается значительное содержание биогенов (табл. 2).

Таблица 2

Физико-химические свойства делювия на пашнях исследуемого района

Table 2

Physicochemical properties of deluvium on arable land in the study area

Объект и дата отбора проб	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Гумус, %	N, %	P, %
	мг-экв / 100 г. почвы					
Лучаново, канал стока в депрессию на южном склоне пашни, 29.04.2007 г.	25,3	19,6	5,7	3,99	н.о	н.о
10 км, днище депрессии, 30.04.2007 г.	23,8	10,6	13,2	1,72	н.о	н.о
10 км, днище депрессии, 01.05.2008 г.	24,1	18,2	5,9	3,50	н.о	0,3
Лучаново, днище депрессии на плакоре пашни, 26.04.2011 г.	18,8	16,0	2,8	1,90	0,11	0,35
Лучаново, поле аккумуляции пашня южный склон, 07.05.2023 г.	36,6	20,6	16,0	2,47	0,98	0,17
Лучаново, поле аккумуляции, рядом с лесополосой, 12.05.2024 г.	13,1	10,7	2,4	5,14	0,27	0,29

В гранулометрическом составе делювия, осаждающегося на склонах и днищах депрессий исследуемого района, доминирует фракция крупной пыли (0,05–0,01): от 24,0 % до 45,2 %. Объемы поступающего делювия на днища депрессий, как отмечалось ранее, могут быть значительными, но они не учитываются при использовании существующих методов оценки интенсивности водной эрозии.

Наблюдения на пашне ключевого участка «Лучаново» показали, что современные проявления внешней суффозии и просадок представлены двумя видами:

1 – просадками на пашне с образованием понижений на ее поверхности диаметром от первых метров до десятков метров и глубиной от 10–20 см до 0,5 м. Определить скорость развития просадок не представляется возможным вследствие их ежегодной распашки и боронования. Многолетние наблюдения на ключевых участках «Лучаново» и «10 км» показали, что происходит не только образование новых просадок, но и отмечается увеличение площади уже существующих.

2 – внешней суффозией в процессе развития которой происходит транспортировка материала вниз по склону и аккумуляция его у подножия склонов пашни. Образование промытых путей приводит к формированию суффозионных провалов. Такие провалы зафиксированы на задернованном склоне южной экспозиции Лучановского ключевого участка, глубина их в настоящее время – 0,5–0,85 м. По данным наших наблюдений в пределах этого ключевого участка суффозионно-просадочные и эрозионные процессы наиболее активно развиваются на склонах пашни южной экспозиции с 2010 года.

Помимо образования на склонах провалов и промоин в последнее десятилетие происходит процесс возрождения погребенного оврага в форме фрагментов эрозионно-суффозионных

образований по тальвегу бывшего оврага (рис. 5). Этот овраг-промоина образовался на южном склоне пашни вдоль лесополосы и полевой дороги в 1985 г. (по данным агронома Л. Анохина). В 1987 г. он был обследован авторами статьи и наблюдения за ним проводились в последующие годы. Овраг подвергался частичной засыпке, но продолжал расти. Осенью 1990 г. овраг был полностью засыпан в очередной раз гравийно-галечной смесью и землей, поверхность его была выровнена грейдером. Но, интенсивное таяние сугробов снега в лесополосе с 16 по 26 апреля 1991 г. привело к «возрождению» оврага по старому следу. Длина оврага после обследования 28 апреля 1991 г. была равна 129 м, глубина достигала 1,9 м.



Рис. 5. Эрозионно-суффозионные образования: А) эрозионные формы на задернованном склоне;
Б) устье возрождённого оврага-промоины
(фото З.Н. Квасниковой, апрель-май 2026 г.)

Fig. 5. Erosion-suffusion formations: A) erosion forms on a sod-covered slope;
B) the mouth of a revived ravine-gully (photo by Z.N. Kvasnikova, April–May 2026)

В устье оврага образовался конус выноса площадью более 660 м², мощность пролювия в нем достигала 45 см. В составе отложений наблюдались гравий, галька, суглинки и валуны, размеры которых достигали 19×8×3 см. В 1991 году овраг вновь был засыпан, а на склоне вдоль существующей лесополосы были посажены саженцы сосны. Но за 1991–2026 гг. в процессе развития внешней суффозии и стока талых вод в лесополосе на задернованном склоне по следу засыпанного оврага образовались эрозионные формы глубиной до 0,5–0,65 м и длиной до 7–15 м (см. рис. 5). Общая длина оврага-промоины по состоянию на 31 мая 2026 года составляет 42 метра при ширине от 0,2 до 1,4 м.

Выводы

В пределах агроландшафтов юга и юго-востока Томской области широко развиты суффозионно-просадочные формы рельефа – западины (депрессии), глубина их достигает 3–5 м, а частота встречаемости 2–6 депрессий на 1 км², местами чаще. В сосновой лесополосе Лучановского ключевого участка зафиксирована активно формирующаяся эрозионно-суффозионная промоина.

Депрессии на пашне подразделяются на облесенные и необлесенные, местами они обводнены, например, в районе с. Зайцево на междуречье Оби и Шегарки, в районе трассы Кожевниково-Уртам и др.

Крутизна склонов депрессий достигает 10–15° при длине склонов до 50–70 м. В результате весной на днища депрессий пашни поступают смытые с прилегающих участков и склонов почвенные массы. Объем смытого материала зависит от интенсивности снеготаяния, глубины промерзания почв и состояния агрофона и может быть значительным: максимальный из них наблюдался нами в 2013 г. и составил 34,5 м³.

Проявления этого типа эрозии локальны, но оказывают влияние на плодородие почв, микрорельеф пашни. Разрастание депрессий ведет к уменьшению полезной площади пашни; кроме того депрессии часто являются геохимическими барьерами для смытых в результате водной эрозии химических элементов, в том числе биогенных, имеющих важное значение для питания растений.

Литература

1. Llena M., Carreras S., Bernatek-Jakiel A., Ollero A., Nadal-Romero E. Agricultural land abandonment linked to pipe collapse and gully development: Reconstruction from archival SfM and LiDAR datasets. *Geoderma*. 2024; 449: 116995. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116995>.
2. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006: 296.
3. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород. Константа, 2012:456.
4. Сарычев Д.В., Сарычев А.В., Архипцев И.Н., Демченко Н.В., Рыбальченко А.Ю. Развитие и распространение карстовых и суффозионных процессов на территории Белгородской области, оценка их влияния на окружающую среду. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2021; 27(2):42-51. DOI 10.21209/2227-9245-2021-27-2-42-51.
5. Строкова Л.А., Леонова А.В. Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(5):49-59. DOI 10.18799/24131830/2021/5/3185.
6. Morgan R.P.C. Soil Erosion and Conservation. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005:304.
7. Bernatek-Jakiel A., Nadal-Romero E. Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2023;(48):72 -86. <https://doi.org/10.1002/esp.5431>.
8. Dong H., Li X., Wang W., An M. Discrete Element Method Simulation of Loess Tunnel Erosion. *Water*. 2025;(17):1020. <https://doi.org/10.3390/w17071020>.
9. Hosseinalizadeh M., Kariminejad N., Bahremand A., Gangi N., Bernatek Jakiel A., Tazikeh H., et al. Integrating geophysical techniques and UAV mapping for the detection and temporal analysis of soil pipes and pipe collapses in agricultural loess landscapes. *Geoenviron Disasters*. 2025;12(37). <https://doi.org/10.1186/s40677-025-00343-7>.
10. Евсеева Н.С., Пашнева Г.Е., Квасникова З.Н. Делювиальный процесс в агроландшафтах юга Томской области и его эколого-геоморфологические аспекты. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2013;4(24):7-19.
11. Евсеева Н.С., Петров А.И., Каширо М.А., Квасникова З.Н., Батманова А.С., Хон А.В. Влияние рельефа и растительности на распределение снежного покрова в бассейнах малых рек. *Геосферные исследования*. 2017;(4):64-74.
12. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Почвы Обь-Томского междуречья. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2011;3(15):16-22.
13. Врублевский В.А., Нагорский М.П., Рубцов А.Ф. Геологическое строение области сопряжения Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой области. Томск: ТГУ; 1987: 95.
14. Строкова Л.А. Характеристики лессовых пород Томской области. *Известия Томского политехнического университета*. 2003;306(6):32-35.
15. Инженерная геодинамика территории России. М.: Издательский дом КДУ; 2013. 816.
16. Евсеева Н.С. Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Издательство научно-технической литературы; 2009. 483.

References

1. Llana M., Carreras S., Bernatek-Jakiel A., et al. Agricultural land abandonment linked to pipe collapse and gully development: Reconstruction from archival SfM and LiDAR datasets. *Geoderma*. 2024;449:116995. doi: 10.1016/j.geoderma.2024.116995.
2. Golosov V.N. Erosion-accumulation processes in river basins of developed plains. Moscow: GEOS; 2006:296 (in Russian).
3. Lisetskii F.N., Svetlichnyi A.A., Chernyi S.G. Modern problems of erosion science. Belgorod: Konstanta; 2012:456 (in Russian).
4. Sarychev D.V., Sarychev A.V., Arkhiptsev I.N., et al. Development and distribution of karst and suffosion processes in the Belgorod region, assessment of their impact on the environment. *Vestn Zabaik Gos Univ*. 2021;27(2):42–51 (in Russian). doi: 10.21209/2227-9245-2021-27-2-42-51.
5. Strokova L.A., Leonova A.V. Assessment of suffosion hazard in Tomsk. *Izvestiya Tomsk Politekh Univ Inzh Georesurs*. 2021;332(5):49–59 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2021/5/3183.
6. Morgan R.P.C. Soil Erosion and Conservation. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing; 2005:304.
7. Bernatek-Jakiel A., Nadal-Romero E. Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps. *Earth Surf Process Landf*. 2023;48(1):72–86. doi: 10.1002/esp.5431.
8. Dong H., Li X., Wang W., An M. Discrete Element Method Simulation of Loess Tunnel Erosion. *Water*. 2025;17(7):1020. doi: 10.3390/w17071020.
9. Hosseinalizadeh M., Kariminejad N., Bahremand A., et al. Integrating geophysical techniques and UAV mapping for the detection and temporal analysis of soil pipes and pipe collapses in agricultural loess landscapes. *Geoenviron Disasters*. 2025;12:37. doi: 10.1186/s40677-025-00299-w.
10. Evseeva N.S., Pashneva G.E., Kvasnikova Z.N. Deluvial process in agrolandscapes of the south of the Tomsk region and its ecological-geomorphological aspects. *Vestn Tomsk Gos Univ Biol*. 2013;4(24):7–19 (in Russian).
11. Evseeva N.S., Petrov A.I., Kashiro M.A., et al. Influence of relief and vegetation on snow cover distribution in small river basins. *Geosfernye Issledovaniya*. 2017;4:64–74 (in Russian).
12. Dyukarev A.G., Pologova N.N. Soils of the Ob-Tom interfluve. *Vestn Tomsk Gos Univ Biol*. 2011;3(15):16–22 (in Russian).
13. Vrublevsky V.A., Nagorsky M.P., Rubtsov A.F. Geological structure of the junction area of the Kuznetsk Alatau and the Kolyvan-Tom folded zone. Tomsk: TGU; 1987:95 (in Russian).
14. Strokova L.A. Characteristics of loess rocks in the Tomsk region. *Izv Tomsk Politekh Univ*. 2003;306(6):32–35 (in Russian).
15. Engineering geodynamics of the territory of Russia. Moscow: KDU Publishing House; 2013:816 (in Russian).
16. Evseeva N.S. Modern morpholithogenesis of the south-east of the West Siberian Plain. Tomsk: Publishing House of Scientific and Technical Literature; 2009:483 (in Russian).

Сведения об авторах

ЕВСЕЕВА Нина Степановна – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры географии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Scopus ID: 57205478814, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5766-5319>, SPIN-код: 5146-1671

КВАСНИКОВА Зоя Николаевна – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры географии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Scopus ID: 36550480600, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-2112>, SPIN-код: 5910-3854

КАШИРО Маргарита Александровна – кандидат географических наук, доцент кафедры географии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Scopus ID: 57189763217, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4475-0527>, SPIN-код: 8677-8613

ЗАЙЦЕВА Варвара Юрьевна – аспирант кафедры географии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Scopus ID: нет, ORCID: нет, SPIN-код: 9435-7218

About the authors

Nina S. YEVSEYEVA – Dr. Sci. (Geography), Professor, Professor in the Department of Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, Scopus ID: 57205478814, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5766-5319>, SPIN-код: 5146-1671

Zoia N. KVASNIKOVA – Cand. Sci. (Geography), Docent, Associate Professor, Department of Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, Scopus ID: 36550480600, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-2112>, SPIN-код: 5910-3854

Margarita A. KASHIRO – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, Scopus ID: 57189763217, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4475-0527>, SPIN-код: 8677-8613

Varvara Yu. ZAYTSEVA – Postgraduate Student, Department of Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, Scopus ID: none, ORCID: none, SPIN: 9435-7218

Вклад авторов

Евсеева Н.С. – методология, руководство исследованием, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Квасникова З.Н. – проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, визуализация, редактирование рукописи.

Каширо М.А. – проведение исследования, визуализация, редактирование рукописи.

Зайцева В.Ю. – проведение исследования.

Authors contributions

Nina S. Yevseyeva – methodology, study supervision, study implementation, manuscript drafting, manuscript editing.

Zoia N. Kvasnikova – study implementation, data verification, manuscript drafting, visualization, manuscript editing.

Margarita A. Kashiro – study implementation, visualization, manuscript editing.

Varvara Yu. Zaytseva – study implementation.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 30.07.2026

Поступила после рецензирования / Revised 12.08.2026

Принята к публикации / Accepted 21.09.2026