



ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА ПРИ РАЗНОМ СОСТОЯНИИ АГРОФОНА

Евсеева Н. С. ORCID ID 0000-0001-5766-5319,
Квасникова З. Н. ORCID ID 0000-0002-5568-2112,
Каширо М. А. ORCID ID 0000-0003-4475-0527,
Петров А. И., Хон А. В., Зайцева В. Ю., Оленникова А. В.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск,
Российская Федерация, e-mail: zojkwas@rambler.ru*

Цель данной работы – анализ развития водной эрозии почв в условиях меняющегося климата при разном состоянии агрофона сельскохозяйственных ландшафтов юго-востока Томской области. С использованием расчетных и полевых методов были проведены оценка интенсивности развития эрозии почв от стока талых снеговых вод и сравнительный анализ натуральных и расчетных данных по объему смыва почв со склонов разной экспозиции за период с 1989 по 2025 г.; определены объемы смыва почв со склонов с разным агрофоном ливневыми осадками. Многолетние наблюдения за смывом почв со склонов пашни тальми и снеговыми водами ключевого участка в бассейне р. Басандайки показали, что в зависимости от агрофона процесс по интенсивности изменяется от умеренно опасного до весьма опасного. При грубой зяби поперек склона смыв почв незначителен, как и по стерне, всходам озимых, трав. При ливнях с суммой осадков менее 10–20 мм/сут агрофон пашни с посевами сельскохозяйственных культур достаточно хорошо защищает почвы. Экстремальные ливни (> 30 мм/сут и более) преодолевают сопротивление растительного покрова и производят большой объем смыва почв, который можно сравнить с эрозионной работой стока талых вод за ряд лет. Отмечается усиление ливневой деятельности над территорией Томской области с 2017 г. и частота вызванных ею чрезвычайных происшествий, связанных с водной эрозией на пашнях сельскохозяйственных ландшафтов.

Ключевые слова: водная эрозия, смыв почвы, агрофон, климат, Томская область

DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF WATER SOIL EROSION IN CONDITIONS OF A CHANGING CLIMATE WITH DIFFERENT STATES OF THE AGRICULTURAL BACKGROUND

Evseeva N. S. ORCID ID 0000-0001-5766-5319,
Kvasnikova Z. N. ORCID ID 0000-0002-5568-2112,
Kashiro M. A. ORCID ID 0000-0003-4475-0527,
Petrov A. I., Khon A. V., Zaytseva V. Yu., Olennikova A. V.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National Research Tomsk State University”, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: zojkwas@rambler.ru*

The objective of this work is to analyze the development of water erosion of soils under conditions of a changing climate with different states of the agricultural background in agricultural landscapes of the southeast of the Tomsk region. Using computational and field methods, the study assessed the intensity of soil erosion caused by snowmelt runoff. A comparative analysis of field and calculated data on soil loss volumes from slopes of different aspects for the period from 1989 to 2025 was carried out, and the volumes of soil loss from slopes with different agricultural backgrounds due to heavy rainfall were determined. Long-term observations of soil loss from arable slopes by meltwater and snowmelt runoff on an experimental catchment in the Basandaika River basin showed that, depending on the agricultural background, the intensity of the process varies from moderate to extremely hazardous. With contour plowing, soil loss is insignificant, as is the case with stubble, winter crop seedlings, and grasses. During heavy rainfall with total precipitation of less than 10–20 mm/day, the agricultural background of arable land with crops protects the soil quite well. Extreme rainfall events (>30 mm/day) overcome the resistance of the vegetation cover and produce a large volume of soil loss, comparable to the erosive work of meltwater runoff over several years. An increase in heavy rainfall activity over the Tomsk region has been observed since 2017, along with a rise in the frequency of emergencies caused by water erosion on arable lands within agricultural landscapes.

Keywords: water erosion, soil loss, agricultural background, climate, Tomsk region

Введение

Эрозия почв сопровождает земледелие в течение всей его истории. Исследователи отмечают, что особенно возросла ее интен-

сивность в XIX–XX вв. в связи с применением механической тяги на больших по площади полях [1, с. 178]. Обусловлена эрозия почв тальми и ливневыми водами, деятель-

ностью ветра. В последние десятилетия отмечаются региональные изменения климатических факторов – температуры, осадков, оценка которых и степень влияния на почвенно-эрозионные процессы в пределах обрабатываемых земель в настоящее время еще затруднительна [2]. Изменение климатических условий наблюдается и на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. В. П. Горбатенко (2021) [3] отмечает, что Западная Сибирь относится к регионам наибольшей скорости потепления климата, но в отдельных его частях большинство характеристик демонстрируют разные пределы изменчивости основных климатических показателей территории, ограниченных диапазоном координат 55–60° с. ш. и 65–85° в. д. В названных пределах расположена и территория Томской области, где также наблюдаются изменения климата. Так, М. А. Волкова [4, с. 11] установила, что отмечается рост температуры воздуха со скоростью 0,2–0,49 °С за 10 лет. Годовое количество атмосферных осадков в течение последних 50 лет имеет тенденцию повсеместного роста на величину от 2 мм/10 лет до 20 мм/10 лет; причем увеличилась в основном доля ливневых осадков [5]. Продолжительность залегания снежного покрова в среднем составляет 164–180 суток. Но в последние 30 лет наблюдается уменьшение продолжительности залегания, что обусловлено изменениями сроков залегания и разрушения снежного покрова [3]. Увеличение атмосферных осадков, изменение сроков залегания и разрушения снежного покрова играют важную роль в развитии водной эрозии почв как от стока талых снеговых вод, так и ливневой.

Цель исследования – анализ развития водной эрозии почв в условиях меняющегося климата, в том числе при разном состоянии агрофона.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – бассейн р. Басандайки – правого притока р. Томь, дренирующего Томь-Яйское междуречье юго-востока Томской области (рис. 1). Площадь бассейна – 402 км², абсолютные высоты изменяются от 100 до 240 м, крутизна склонов – от 0–1 до 15° в пределах сельхозугодий и до 30–60° на склонах рек, оврагов, балок. Климат территории умеренно континентальный, среднегодовое количество осадков 568 мм [6, с. 47]. За теплый период года их выпадает до 70 % от годовой суммы. Осадки летом выпадают в основном на холодных фронтах циклонов и носят ливневый характер. Для территории характерна значительная толщина снежного покрова (40–70 см). Глубина промерзания почв изменяется по годам от 23–94 см (2008 г.) до 75–150 см (2010 г.) [7]. Почвообразующими породами в пределах Томь-Яйского междуречья являются покровные отложения среднеплейстоцен-верхнеплейстоценового возраста элювиально-делювиального генезиса с привнесом эолового материала, мощность которых изменяется от 1–2 до 10–12 м. Они быстро размокают в воде. Слабая водостойкость отложений – причина широкого развития эрозионных процессов [8]. Бассейн р. Басандайки расположен в зоне подтайги, в его пределах доминируют серые лесные, дерново-подзолистые почвы.

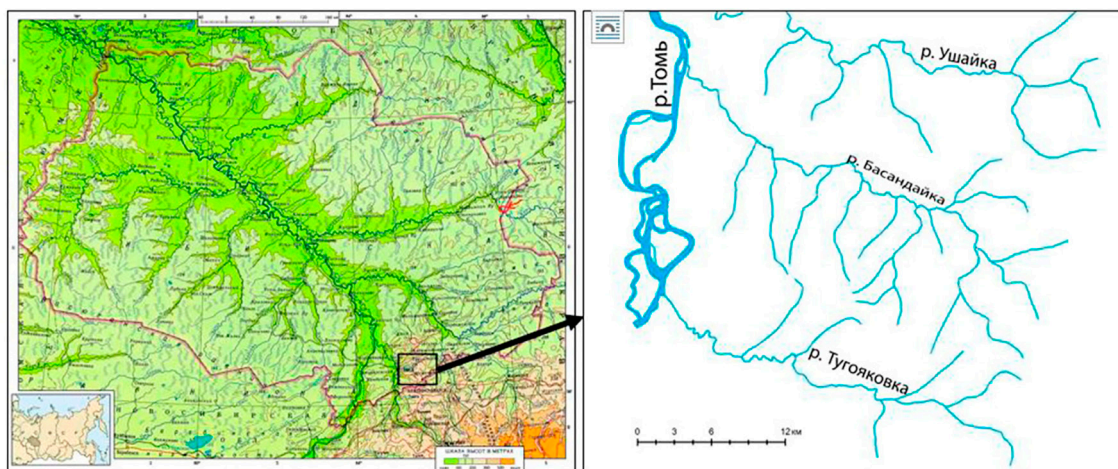


Рис. 1. Местоположение объекта исследования в пределах Томской области
Примечание: составлен З. Н. Квасниковой, М. А. Каширо по результатам данного исследования

В основу работы положены данные многолетних наблюдений (1989–2025 гг.) за эрозией почв на ключевых участках пашни в бассейне р. Басандайки (рис. 1). Наиболее детально водная эрозия изучена на полустационаре «Лучаново», где в пределах ОПХ им. Б. Н. Сидоренко площадь ключевого участка – около 100 га, из них около 54 га – пашня, из которой 30 га на склонах южной и 23 га – северной экспозиции. Остальные 46 га занимает кедровый лес. Абсолютные высоты – 120–160 м, а относительные – от 0,2–1,0 до 25–30 м. В пределах пашни преобладают склоны, близкие к прямым и выпуклым с меняющимися уклонами, местами они осложнены суффозионно-просадочными депрессиями, ложбинами; между полей вдоль склонов имеются лесополосы из сосны и березы.

На полустационаре «Лучаново» проводятся ежегодные снегосъемки в микромасштабе в конце марта; подсчет запасов влаги в снеге, рассчитывается интенсивность снеготаяния, измеряются скорости потока в микроруслах и глубины оттайки почв. После снеготаяния ежегодно обследуются микрорусла на пашне и измеряются их параметры, замеры проводились в зависимости от формы русла потока через 1–2 до 10 м. В камеральных условиях также оценивались влагозапасы в снежном покрове в соответствии со Сводом правил [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных многолетних наблюдений на ключевых участках позволил:

выявить интенсивность развития эрозии почв от стока талых снеговых вод и влияние агрофона на нее; провести сравнительный анализ натуральных и расчетных данных по объему смыва почв со склонов; оценить объемы смыва почв со склонов с разным агрофоном ливневыми осадками. Рассмотрим данные положения в указанной последовательности.

Талая эрозия почв – сложный природно-социальный процесс, зависящий от сочетания ряда как природных, так и антропогенных факторов. Многолетние наблюдения на двух склонах пашни южной экспозиции полустационара «Лучаново» подтверждают сложность проявления процесса, так как при одних и тех же погодных условиях года смыв почв на разных участках склона пашни различается. В среднем за многолетние исследования запасы влаги в снежном покрове для пашни южного склона составили 142 мм [10], но разбиение этого ряда наблюдений на десятилетние промежутки позволило выявить крупномасштабные временные колебания: так за 1988–1997 гг. среднее значение влагозапасов составило 122 мм; за 1997–2007 гг. – 153 мм; за 2008–2017 – 152 мм и за 2018–2023 гг. – 114 мм. Но средние значения влагозапасов не отражают истинной картины этого показателя вследствие неравномерного залегания снежного покрова из-за деятельности метелей: толщина снежного покрова на пашне изменяется от 0 до 30 см (рис. 2, а) на наветренных выпуклых участках пашни – до 1,5–2,4 м в сугробах лесополос и в депрессиях рельефа (рис. 2, б).



Рис. 2. Неравномерное залегание снежного покрова Лучановского полустационара в бассейне р. Басандайки: а – на плакоре пашни (фото З. Н. Квасниковой, март 2015), б – в сугробе у лесополосы (фото М. А. Каширо, март, 2018)



Рис. 3. Промоины с порожистым руслом на пашне ключевого участка в бассейне р. Басандайки: А – апрель 2021 г., Б – март 2022 г. (фото З. Н. Квасниковой)

Такое явление, наряду с влиянием микро рельефа пашни и глубиной оттайки почв от 5 – 10 до 25–35 см, вызывает неравномерность смыва почв со склонов. Большое влияние на талую эрозию также оказывает крутизна склонов и интенсивность снеготаяния. За годы наблюдений она изменялась от 8,7–9,8 мм/сут (1997–1998 гг.) до 52,5 мм/сут, составляя в среднем 12,9–15,9 мм/сут. Наблюдения за скоростями воды в руслах микропотоков показали, что они изменяются от 0,01–0,5 до 1,5–2,0 м/с. Такие скорости способны подвергать размыву грунты, слагающие поверхность территории: допустимые неразмывающие скорости этих пород изменяются от 0,27–0,37 до 0,65–0,75 м/с. Скорости потока от 0,7–1,5 м/с на склонах крутизной 5–7° и более образуют промоины глубиной до 1,5 м с порожистым руслом (рис. 3). Наблюдения показали, что большое влияние на интенсивность развития талой эрозии оказывает состояние агрофона: наибольший смыв почвы происходит по боронованной зяби. В зависимости от длины, крутизны, формы склона, интенсивности снеготаяния, наличия ложбин, осложняющих склон, смыв изменяется от 1–5 до 20–26 м³/га.

Согласно СП (2021) [9], процесс талой эрозии почв по зяби относится к опасным (5–10 м³/га) и весьма опасным (10–15 м³/га). По грубой зяби – глубокой вспашке поперек

склона смыв почв талыми водами изменяется от 0,5–1,0 до 4–5 м³/га, лишь в 1989 г. он составил 7–8 м³/га. На склонах со сложным агрофоном (стерня, озимые, клевер, многолетние травы, скошенный лен) смыв почв относится к умеренно опасным и составляет в основном 2–5 м³/га, на отдельных участках поля – 6–7 м³/га. Большое влияние на развитие талой эрозии почв оказывают лесополосы: максимальный смыв почв происходит с обеих сторон лесополос, особенно в годы с коротким периодом снеготаяния. За период наблюдений с 1991 по 2023 г. зафиксированы объемы смыва от 11–12 м³/га в 2014 г. до 45–50 м³/га в 1992, 2010 гг. Максимальный объем смытых почв составил 81 м³/га в 2011 г. В последние 10 лет интенсивность смыва почв талыми снеговыми водами в пределах Лучановского полустационара уменьшилась до умеренно опасных значений благодаря грамотной работе агронома ОПХ им. Б. Н. Сидоренко Д. А. Савельевой, проводящей организацию сложных агрофонов на южных склонах пашни.

О ливневой эрозии почв. В теплое время года территория Томской области – очаг ливневой деятельности. За лето выпадает до 300–400 мм осадков, носящих ливневый характер, продолжительность которых изменяется от 1 мин до 7–9 ч, средняя интенсивность ливней варьирует от 0,11 до 3,0 мм/мин, но наблюдаются ливни с очень высо-

кой интенсивностью выпадения – более 5 мм/мин, они особенно опасны для развития эрозии почв. За сутки может выпасть 50–100 мм осадков [11]. Анализ суточных норм осадков показал, что за 1960–2023 гг. отмечается увеличение числа случаев выпадения ливней на исследуемой территории – Томь-Яйском междуречье. Кроме того, установлена тенденция увеличения максимальной пентадной суммы осадков после 2000 г. [12]. В отдельные годы суммы осадков, выпавших за 5 последовательных суток, могут превышать месячную норму осадков на 100 %. Выявляются ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков. Например, 9 августа 1994 г. за 5 суток выпало 135,3 мм осадков при месячной норме 76 мм. В выпадении таких осадков прослеживается квазипериодичность (2 года и 6 лет), но предвидеть год, благоприятный для формирования экстремальных осадков на территорию, не представляется возможным [13]. Количество случаев сильных дождей (не менее 50 мм за 12 ч) меняется в пространстве и объясняется значительным влиянием локальных условий и по годам, что определяется циркуляционными факторами [14]. Все вышесказанное объясняет сложность и слабую изученность ливневой эрозии почв на юго-востоке Томской области.

Авторами данной работы для оценки эрозионных последствий ливней в агроландшафтах использованы расчетный метод и полевые наблюдения за эрозионным эффектом после выпавших 17 ливней. Эрозионный индекс осадков (R_{30}) территории составляет 4–6 единиц, он сопоставим с таковым для центральных частей европейской территории России, Урала. Для оценки потенциального смыва почв дождевыми осадками авторами проведены расчеты потенциального смыва для основных типов почв, вовлеченных в агропроизводство. Он изменяется от 1,9–3,65 т/га у серых лесных почв до 2–2,6 у темно-серых и от 1,45 до 3,95 – у светло-серых почв, но в случае сильных ливней может достигать 32,6 т/га.

Полевые наблюдения на ключевых участках «Лучаново» в течение 1987–2025 гг. показали, что сильные ливни разной продолжительности и интенсивности вызывают значительный смыв и размыв почв со склонов пашни, особенно ливни, выпадающие в течение двух суток. Максимальный смыв почв от стока ливневых вод зафиксирован авторами во время ливней 30.06.1987, когда за 5,5 ч выпало 53,7 мм и 01.07.1987 – 20,6 мм за 4 ч; на склонах крутизной 3–8°

под посадками картофеля он составил 40–100 м³/га (44–110 т/га). На этом склоне длиной 300–500 м образовались промоины и струйчатые размывы. Размеры наиболее крупной из промоин составили в длину около 200 м и глубину до 0,7 м. На коротком склоне длиной 50–100 м и крутизной 3–11° под паром смыв составил 6–7 м³/га (7–8 т/га). Показателен также пример смыва почв после ливней 03.07.2020 и 07.07.2020, когда выпало 51,0 и 21,0 мм осадков соответственно. Со склона пашни длиной 400 м и крутизной от 1 до 6° под посевами льна в стадии бутонизации и высотой до 60–70 см было смыто от 1–5 до 8–10 м³/га на разных его участках. В результате у подножия склона образовался делювиальный шлейф с толщиной делювия до 5–10 см. Наблюдения за последствиями смыва почв в течение 35 лет показали, что в случае выпадения ливней со слоем от 10 до 30 мм, но с агрофоном из стерни, посевами льна, злаковых в стадии кущения и др., смыв почв варьировал от 0,5 до 1,0 до 5–8 м³/га [15]. Таким образом, согласно СНиП (2018) процесс ливневой эрозии в зависимости от состояния агрофона изменяется от умеренно опасного 2–5 м³/га до весьма опасного – 10–15 м³/га.

Заключение

Многолетние наблюдения за эрозией в бассейне р. Басандайки показали, что на склонах крутизной более 1–2° во время снеготаяния развивается талая эрозия почв, а после сильных дождей – ливневая. В зависимости от агрофона интенсивность процесса изменяется от умеренно опасного до весьма опасного. Для защиты почв от стока талых снеговых вод следует избегать состояния на пашне боронованной зяби, так как смыв почв происходит на суглинистых почвах при уклонах 0,5–1°, а размыв – при уклонах 2° и более. При грубой зяби поперек склона смыв почв незначителен, как и по стерне, так и по всходам растений. Отмечается усиление ливневой деятельности над территорией Томской области с 2017 г. и частота вызванных ею чрезвычайных происшествий, что согласуется с общими тенденциями изменения климата. Экстремальные ливни (> 30 мм/сут и более) преодолевают сопротивление растительного покрова и производят большой объем смыва почв, который можно сравнить с эрозионной работой стока талых вод за ряд лет. При ливнях с суммой осадков менее 10–20 мм/сут агрофон пашни с посевами сельскохозяйственных культур хорошо защищает почвы.

Список литературы

1. Овчинникова Т. В., Куприенко П. С., Федянин В. И. Опасные природные процессы экзогенного происхождения. Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2007. 205 с. EDN: QKGLPB.
2. Литвин Л. Ф., Кирюхина З. П., Краснов С. Ф., Добровольская Н. Г., Горобец А. В. География динамики земледельческой эрозии почв Сибири и Дальнего Востока // Почвоведение. 2021. № 1. С. 136–148. DOI: 10.31857/S0032180X2101007X.
3. Горбатенко В. П. Тенденции климатических характеристик, определяющих развитие транспортной системы Западной Сибири // Динамика и взаимодействие геосфер земли: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. В 3 т. (г. Томск, 08–12 ноября 2021 г.). Т. II. Томск: Томский центр научно-технической информации, 2021. С. 113–116. EDN: YAOHPS.
4. Волкова М. А. Оценка изменчивости температурно-влажностного режима на территории Томской области и его влияние на радиальный прирост *Pinus Sibirica* Du Tour. автореф. дис... канд. геогр. наук. Томск, 2000. 22 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bd000131705/view/?#page=12> (дата обращения: 10.02.2026).
5. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2015. № 576. С. 129–152. EDN: TODWMJ.
6. Филандышева Л. Б., Ромашова Т. В., Юркова К. Д. Географические особенности г. Томска и динамика сезонных ритмов в условиях глобального изменения климата. Томск: ТГУ, 2021. 254 с. ISBN 978-5-94621-978-2.
7. Дюкарев А. Г., Пологова Н. Н. Почвы Обь-Томского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 3 (15). С. 16–37. EDN: ODVJWP.
8. Евсеева Н. С., Квасникова З. Н., Каширо М. А., Батманова А. С. Факторы развития и интенсивность ливневой эрозии на пашне Томь-Яйского междуречья // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 51–63. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.51.
9. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция. М.: Стандартинформ, 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202> (дата обращения: 07.02.2026).
10. 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. С. 64–74. DOI: 10.17223/25421379/5/6.
11. Сморгалова А. Г. Характеристика ливневых дождей по Омской, Томской и Тюменской областям // Вопросы географии Сибири. Томск, 1976. Вып. 9. С. 30–34. EDN: WVLYAL.
12. Кужевская И. В., Горбатенко В. П., Носырева О. В., Волкова М. А., Нечепуренко О. Е., Чурсин В. В., Черedyкo Н. Н. Агроклиматические характеристики земель сельскохозяйственного назначения на территории Сибирского федерального округа в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2023. № 10. С. 77–87. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-10-77-87.
13. Кужевская И. В., Пустовалов К. Н., Шарапова А. А. Характеристики конвективных кластеров, восстановленные по данным инструментов зондирования ATOVS // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 2. С. 69–85. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-2-69-85.
14. Черedyкo Н. Н., Волкова М. А., Кужевская И. В., Чурсин В. В. Экстремальные летние осадки в Сибири в 2015–2021 гг. // ENVIROMIS-2022: международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды (г. Томск, 12–17 сентября 2022 г.). Томск: Томский ЦНТИ, 2022. С. 332–335. DOI: 10.5281/zenodo.7136752.
15. Евсеева Н. С., Квасникова З. Н., Кужевская И. В. Ливни как природный риск и их экологические аспекты (на примере южной части Томской области) // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 73–84. DOI: 10.17223/25421379/21/6.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.