

УДК 911.2+9; 631.435

С.В. Солодянкина¹, Т.И. Знаменская², Ю.В. Вантеева³, М.Ю. Опекунова⁴

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ И ВОДНОЙ ЭРОЗИИ В СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ ПРИОЛЬХОНЬЯ

В результате полевых экспериментальных исследований 2015–2018 гг. в степных ландшафтах Приольхонья получен ряд количественных характеристик процессов водной и ветровой эрозии. Определены количество и свойства переносимых частиц, а также собраны данные для статистического анализа факторов, влияющих на развитие эрозионных процессов.

Ключевые слова: эксперимент, эрозионные процессы, учет переноса вещества, рекреационное воздействие, статистический анализ

Введение. Водная и ветровая эрозия почв является на сегодняшний день одной из актуальнейших международных проблем, особенно в засушливых регионах. Несмотря на то, что за последние несколько десятков лет накоплен большой опыт в моделировании эрозионных процессов, ощущается нехватка моделей, которые адекватно описывают эрозию почв для различных природно-климатических условий. Для их разработки и проверки требуется большой объем данных натурных наблюдений и экспериментальных измерений в различных условиях [Керженцев с соавт., 2006].

На сегодняшний день разработано огромное количество различных экспериментальных методик исследования как ветровой, так и водной эрозии. Для выявления факторов, влияющих на развитие эрозии, и количественного измерения объемов переносимого вещества чаще используют различные пыле- и пескоуловители, ловушки наносов, фильтры, счетчики для регистрации перемещения почвенных частиц и т. п. [Nai et al., 2009; Webb et al., 2015]. Для исследования водной эрозии широко применяются методы стоковых площадок и искусственного дождевания в различных природных комплексах [Grismer, 2012]. Перечисленные методы позволяют с той или иной точностью оценить потери почвы, т. е. последствия эрозии.

Территория Приольхонья (центральная часть западного побережья оз. Байкал, юг Восточной Сибири), выбранная в качестве объекта исследования, подвержена развитию интенсивных процессов денудации [Агафонов, 1990], которые в настоящее время усугубляются активной рекреационной деятельностью, развивающейся со второй половины прошлого века. С 1960-х гг. в рамках комплексных физико-географических исследований на стационарах Института географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР накоплен богатый фактический материал по региональным особенностям и интен-

сивности эоловой миграции вещества на юге Сибири [Баженова, 2018]. Выявлено, что в степных ландшафтах Приольхонья за год (через метровое сечение ширины наветренного склона) ветром переносится до 300–700 г мелкозема [Агафонов, 2002]. Скорость смыва почвы вследствие водной эрозии на степных склонах (крутизной от 20 до 40–45°) Приольхонья и о. Ольхон составляет 0,0073 и 0,0011 мм/год соответственно [Баженова с соавт., 1998]. По данным экспериментальных исследований Б.П. Агафопова [1990] происходит снос преимущественно мелкопесчаной фракции.

Для данной территории существует необходимость мониторинга эрозионных процессов и количественного учета переноса вещества. Полученные экспериментальные данные на локальном уровне ландшафтных исследований и рассчитанные показатели зависимости водной и ветровой эрозии от геосистемных характеристик в Приольхонье позволяют сделать прогноз развития изучаемых процессов и обосновать размещение и выбор природоохранных мер.

Объект исследования. Территория исследования расположена в северной части Приольхонского плато. Климат засушливый с умеренно теплым летом и умеренно холодной малоснежной зимой [Трофимова, 2002]. Годовое количество осадков составляет 200–300 мм. Большая их часть выпадает в летний период (июль–август) в виде ливней. Глубина снежного покрова варьирует от 0 (в результате выдувания) до 15 см. Среднегодовая температура воздуха составляет –1°C, относительная влажность – 63%. Средняя скорость ветра 5,4 м/с, иногда достигает скорости урагана (20–30 м/с). Летом в связи с местным антициклональным полем развиваются бризовая и горно-долинная циркуляции [Семенов с соавт., 2004].

Рельеф Приольхонья представляет собой денудационный мелкосопочник с абсолютными высота-

¹ Институт географии В.Б. Сочавы СО РАН, лаборатория теоретической географии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: solodyankinasv@mail.ru

² Институт географии В.Б. Сочавы СО РАН, лаборатория геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: tiznam@mail.ru

³ Институт географии В.Б. Сочавы СО РАН, лаборатория теоретической географии, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: ula.vant@mail.ru

⁴ Институт географии В.Б. Сочавы СО РАН, лаборатория геоморфологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: opekunova@irigs.irk.ru

ми 456–989 м и глубиной эрозионного вреза котловин 100–200 м. Отличительной чертой элементов рельефа является прямолинейность, подчиненность общей структуре зоны динамического влияния Приморского разлома. На описываемой территории это узкие вытянутые гребни, гряды, холмы. Останцы сложены устойчивыми к выветриванию породами (пегматитами, амфиболитами, гнейсами). Маловодные и сухие долины расчленяют территорию на систему изолированных мелких котловин и изометрических возвышенностей.

Почвенный покров территории не сплошной, а фрагментарный. По рельефу, динамичности и грубообломочности субстрата формирование почв с полноразвитым профилем на крутых склонах крайне затруднено. Доминируют почвы, имеющие ряд особенностей: легкий гранулометрический состав, высокую скелетность, слабую оструктуренность и водопрочность, распыленность, невысокое содержание гумуса, наличие водоупора на небольшой глубине.

Приольхонье отличается своеобразием природных ландшафтов. Здесь широкое распространение получили экстразональные степи в сочетании со светлохвойными лесами: разнотравно-типчачковые, низкотравные и разнотравно-ковыльные степи с караганой, лиственничные редколесья с кизильником разнотравно-злаковые или разнотравно-полынные на петроземах или серогумусовых сильно скелетных почвах с выходами горных пород. В межгорных и приозерных понижениях – заболоченные разнотравно-осоковые луговины на аллювиальных темногумусовых почвах.

В районе исследования развит широкий спектр экзогенных рельефообразующих процессов – обвалы и осыпи, карст, дефляция, сели, эрозия. Доминирующими по характеру и типу распространения становятся процессы линейного размыва, а также дефляции, так как их развитие тесно связано с воз-

растающей антропогенной (рекреационной) нагрузкой [Агафонов, 1990; Опекунова, Макаров, 2018]. Степная территория позволяет передвигаться на машинах без дорог в различных направлениях. В результате формируется целая сеть нарушенных участков с образованием глубоких промоин (рис. 1).

Методы исследования. Для исследования был выбран ключевой участок площадью 20 км², расположенный на юго-восточном побережье залива Мухор (рис. 2). В 2015–2018 гг. на нем производились экспериментальные исследования процессов денудации в совокупности с почвенными и ботаническими описаниями в разных группах фаций. На тестовых площадках фиксировались координаты, определялись характеристики местоположения и особенности рельефа (уклон, экспозиция, характер микрорельефа), растительности (ярусная структура, проективное покрытие видов, высота и пр.), почв (мощность профиля, гранулометрический состав, цвет, структура, плотность и пр.) и водного режима общепринятыми методами.

Для характеристики литологического состава горных пород в аридных горных условиях Приольхонья с маломощным чехлом рыхлых отложений важным косвенным показателем устойчивости геосистем является скорость денудации, определяющаяся скоростью выветривания (т. е. разрушение и изменение горных пород и минералов совокупностью физических, химических, биологических и др. процессов за определенный период времени), которая по данным В.М. Будза и Ю.Б. Тржцинского [1968] в пределах ключевого участка изменяется от 0,2 до 0,75 см/год, и коэффициентом выветрелости пород (отношение плотности выветрелого грунта к плотности невыветрелого) [Золотарев, 1971], варьирующим на территории исследования от 0,21 до 0,97 [Пеллинен, Козырева, 2019]. Для оценки интенсивности линейной эрозии определялась расчлененность территории эрозионными формами с по-

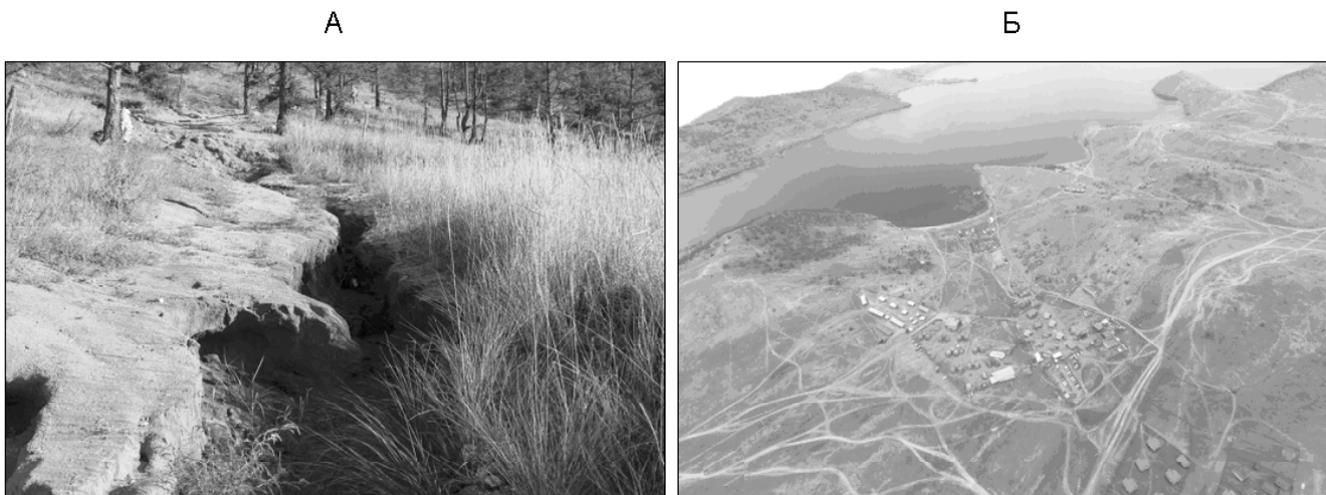


Рис. 1. Процессы линейного размыва вдоль грунтовых дорог: А – овражная эрозия вдоль дороги; Б – сеть дорог (фото С.А. Макарова)

Fig. 1. Linear erosion processes along earth roads: А – gully erosion along the road; Б – road network (photo by S.A. Makarov)

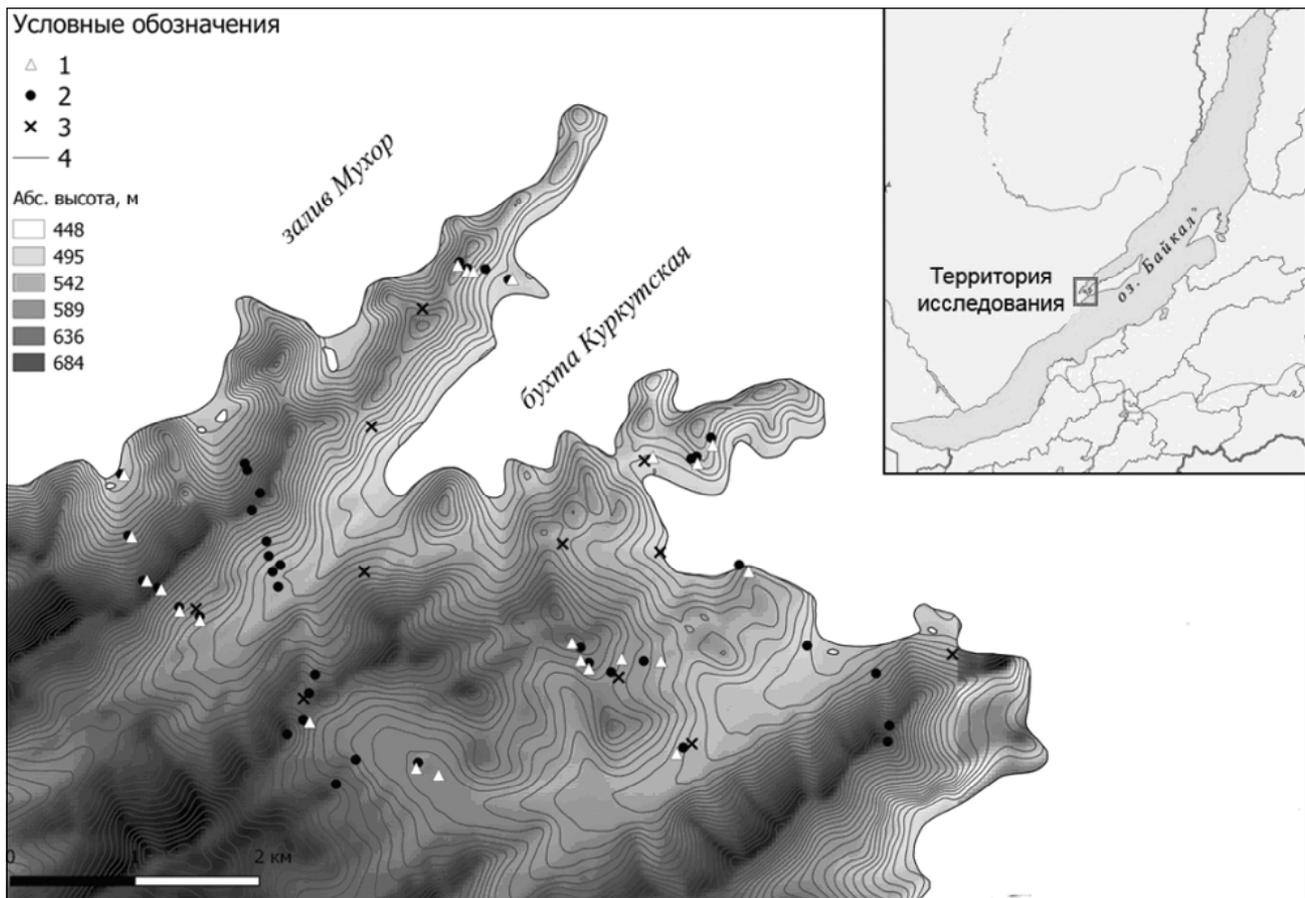


Рис. 2. Расположение ключевого участка исследования (подложка – ЦМР, построенная по данным SRTM, разрешение 30 м): 1 – экспериментальные измерения методом дождевания, 2 – измерения концентрации частиц счетчиком, 3 – экспериментальные измерения ловушками (пылеулавливателями), 4 – горизонтали с высотой сечения 10 м

Fig. 2. Location of the study area (background is the DEM constructed according to SRTM, resolution 30 m). Legend: 1 – experimental measurements by rainfall simulator, 2 – measurements of particle concentration by a counter, 3 – experimental measurements with traps (dust collectors), 4 – contour lines with 10 m interval

мощью учета новых промоин и изменения их морфометрических показателей. Измерение скорости роста вершин и отступления бровок промоин производилось с помощью реперов. Первые данные таких измерений показали, что расширение крупных промоин происходит в основном за счет процессов отседания, обрушения и разрушения блоков грунта в их боковых уступах, в результате чего происходит также уменьшение глубины эрозионных форм. Скорость таких процессов достигает 10 см/год и наиболее интенсивно они проявляются в приустевых частях крупных промоин. Для оценки интенсивности процессов и объемов переносимого материала в пределах промоин пока не хватает фактических данных.

Измерение переноса терригенного материала дождевыми осадками проводилось методом дождевания с помощью специально собранной установки (рис. 3), улавливающей переносимый поверхностным стоком мелкозем [Znamenskaya et al., 2018]. Количественный учет сносимой ветром почвы осуществлялся с применением комплекса ловушек (пылеуловителей) на разных высотах (табл. 1), а также счетчика частиц (модель DT-9880) (табл. 2) и цифрового термоанемометра (DT-618). Вкапыва-

лась стальная труба с площадью сечения на поверхности 1500 см², а на высотах 30, 60 и 90 см над поверхностью земли закреплялись три пластиковые емкости с общей площадью поверхности 143 см² (см. рис. 3). Уловленное вещество взвешивалось, определялись размеры частиц. Для определения сравнительных (относительных) оценок взвешенного вещества в приземном слое воздуха проводился подсчет количества переносимого вещества на 1 м³ за сутки с шагом в 1 см. Показания наземной ловушки приняты для диапазона 0–10 см от поверхности земли, на высоте 30 см – для диапазона 11–45 см, на высоте 60 см – для диапазона 46–75 см, на высоте 90 см – для диапазона 76–100 см (см. табл. 1).

Результаты и обсуждения. В результате полевых и экспериментальных исследований получен ряд количественных характеристик процессов водной и ветровой эрозии, сформирована база данных экспериментальных измерений (см. табл. 1, 2) за четырехлетний период наблюдений, включающая основные параметры отдельных компонентов ландшафта (почвенного и растительного покрова) и метеоусловий. Всего выполнено 36 измерений методом дождевания, 70 – счетчиком частиц и 11 – ловушками (см. рис. 2).



Рис. 3. Комплекс методов измерения процессов денудации
 Fig. 3. Complex of methods for measuring denudation processes

Метод искусственного дождевания для исследования водной эрозии широко применяется, но имеет ряд ограничений, которые не позволяют получить абсолютные оценки потери почв из-за ограниченных размеров площадок дождевания (длина составляет 0,5–3 м). Вследствие чего глубина водного потока на таких площадках не может превышать нескольких миллиметров, тогда как в реальных условиях она достигает нескольких сантиметров и более. Как отмечает ряд авторов [Grismer, 2011; Лисецкий, 2012 и др.], применение метода искусственного дождевания корректно использовать для исследования отдельных элементов эрозионно-аккумулятивного процесса, например, разрушения верхнего слоя почвы под действием дождя, установ-

ление зависимостей между инфильтрационными свойствами почвы, интенсивностью и продолжительностью дождя, исследования влияния различных мелiorационных мер и т. д.

В рамках нашего исследования получены относительные количественные показатели водной эрозии, позволившие проанализировать зависимость этого процесса от ландшафтных характеристик территории [Znamenskaya et al., 2018]. Проведенный статистический анализ собранных данных по водной эрозии показал, что основными факторами, влияющими на развитие данного процесса в Приольхонье, являются крутизна склона и характерное для этой территории большое количество песка мелкой фракции в верхнем горизонте почвы.

Таблица 1

Итоги экспериментального измерения денудации

Группа фаций ¹	Масса уловленного вещества в ловушках (г)					Дождевание (г/м ² за 10 мин. полива)*
	0 см	30 см	60 см	90 см	в 1 м ³	
Привершинные и склоновые разнотравно-типчаковые и низкотравные иногда с караганой степи с выходами горных пород	0,18	0,01	0,01	0,01	74,6	0,1–0,4
Склоновые карагановые злаково-разнотравно-осочковые степи	0,11–0,22	0,01	0,02	0,02	125,9	0,4–27,8
Склоновые разнотравно-типчаковые степи	0,03–0,73	0,01–0,02	0,004–0,04	0,0–0,02	53,9–193,8	0,1–3,5
Склоновые разнотравно-ковыльные степи	0,02	0,06	0,01	0,001	162,7	–
Пологих склонов и межгорных понижений разнотравно-злаковые степи	0,1–1,34	0,02–0,04	0,01–0,02	0,001–0,01	156,8–245,3	1,3
Селитебные	0,25–0,31	0,01	0,01	0,02	93,5	8,2–33,2

*Примечание – данные по дождеванию приводятся в соответствии с ранее опубликованной работой [Znamenskaya et al., 2018].

¹ Группы фаций приведены в соответствии с ландшафтной картой [Вантеева, 2018].

Таблица 2

Максимальные и минимальные концентрации частиц

Группа фаций	Высота, м	Концентрация частиц в воздухе 14–20.09.2017					
		0,3	0,5	1	2,5	5	10
Склоновые разнотравно-ковыльные степи	0,5	73–478	13–128	8–44	0–6	0–2	0–1
	1,5	64–143	18–92	0–24	0–2	0	0
Селитебные	0,5	935–10 777	148–2 603	24–340	2–56	1–21	0–13
	1,5	544–41 914	215–7 764	21–729	1–73	0–17	0–4

Исследование дефляции проводилось с помощью комплекса ловушек. Так как перемещение почвенных частиц при ветровой эрозии происходит несколькими способами: перекачиванием или скольжением по поверхности почвы, перемещением скачкообразно и передвижением во взвешенном состоянии, то и приборы подбираются соответствующие. Установка ловушек совместно с пылеуловителями на разных высотах позволили сделать относительную количественную оценку объемов переноса почвы. Значения на площадках варьируют в пределах от 54 до 245 г/м³. Множественный регрессионный анализ данных, полученных с наземных ловушек, подтвердил, что влияющими факторами являются скорость ветра, относительная влажность воздуха и крутизна склона ($R^2=0,8$ с достоверностью $p=0,007$). Измеренное счетчиком количество частиц размером 10 и 5 мкм и уловленное вещество ловушкой на высоте 90 см связаны с парными коэффициентами корреляции 0,72 и 0,76 соответственно. Статистический анализ влияния имеющихся метеорологических и почвенных показателей на перенос, уловленный на высоте 60 см, выявил высокую положительную парную корреляцию с плотностью почвы и с содержанием фракций мелкого песка, средней и мелкой пыли в верхнем горизонте почвы. На высоте 90 см – с плотностью почвы и содержанием фракции средней пыли в верхнем горизонте почвы (табл. 3). Анализ гранулометрических

фракций уловленного материала показал, что 82% составляет мелкопесчаная фракция, 16,5% – крупный песок и 1,5% – фракции размером более 1 мм, уловленные в основном наземными ловушками. Проведенные ранее экспериментальные исследования в степях Приольхонья [Баженова, 2018] показали, что во время штормовых ветров в движение вовлекаются дресва и мелкая щебенка, что согласуется с полученными результатами.

Сравнивая измерения, выполненные счетчиком частиц, в разные годы и периоды, выявлено, что показания сильно варьируют (на порядок), в то время как показания, снятые в один период наблюдения в течение нескольких дней, изменяются в минимальных пределах. Счетчик измеряет содержание взвешенных твердых частиц размером от 0,3 до 10 мкм, характерным для аэрозолей в атмосфере. На показания счетчика влияет прозрачность атмосферы, меняющаяся не только в зависимости от сезона года, но и уровня загрязнения аэрозолями в определенный период. В качестве дополнительного эксперимента проведены измерения счетчиком до и после проезда машины по грунтовой дороге со скоростью 37 км/ч на расстоянии 2 м от дороги. Зафиксировано увеличение содержания пыли на высоте 1,5 м в 1000 раз (табл. 4).

Для анализа данных, полученных счетчиком частиц, необходимо учитывать влияние спонтанных выбросов загрязнений (автотранспорт, печное отопление) и прозрачности атмосферы. В связи с этим данные, полученные в разные периоды, анализировались по отдельности и измерения проводились в фоновых условиях.

Для выявления факторов, оказывающих влияние на концентрацию частиц в воздухе вследствие ветровой эрозии, выполнен множественный регрессионный анализ данных, полученных в 2017 г. с помощью счетчика частиц на высотах 0,5; 1,5 и 2,0 м от поверхности земли в двукратной повторности и набора параметров, собранных в ходе полевых работ на тестовых площадках: скорость ветра (максимальная и средняя, м/с), относительная влажность воздуха (%), температура воздуха (°С), проективное покрытие травянистого и древесного ярусов (%), крутизна склона (°), содержание в верхнем горизонте почвы фракций песка и пыли, каменистость, плотность почвы. В качестве дополнительного параметра по данным мультиспектральной космической

Таблица 3

Парные коэффициенты корреляции

Высота ловушек от поверхности земли	X	R
0 см	Каменистость, %	-0,7
30 см	Фракция 0,05–0,01 мм, %	0,69
60 см	Почвенный углерод, %	0,93
60 см	Плотность почв, г/см ³	0,87
60 см	Фракция 0,25–0,05, %	-0,77
60 см	Фракция 0,01–0,005, %	0,78
60 см	Фракция 0,005–0,001, %	0,85
60 см	Физический песок, %	-0,81
60 см	Физическая глина, %	0,81
90 см	Плотность почв, г/см ³	0,77
90 см	Фракция 0,01–0,005, %	0,82
90 см	Физический песок, %	-0,78
90 см	Физическая глина, %	0,78

Таблица 4

Количество частиц в 0,5 л воздуха до и после проезда автомобиля

Размер частиц (мкм)	10	5	2,5	1	0,5	0,3
До (скорость ветра 2,3–3,1 м/с)	2	7	22	107	985	4 383
После	2 187	4 579	11 935	26 707	106 201	236 915

съемки (Sentinel-2, от 30 сентября 2017 года) рассчитан почвенный вегетационный индекс SAVI. В ходе пошагового статистического анализа показатели с уровнем значимости $p > 0,05$ из анализа исключались. Для определения факторов, оказывающих наибольшее влияние на концентрацию частиц в воздухе, рассчитывались бета-коэффициенты (β). Согласно результатам регрессионного анализа, на высоте 0,5 м на увеличение концентрации частиц размером 0,3; 0,5 и 2,5 мкм в воздухе наибольшее положительное влияние оказывают количество ила в верхнем горизонте почвы ($\beta=0,56, 0,58$ и $0,47$ соответственно) и крутизна склона ($\beta=0,49, 0,41$ и $0,40$), отрицательно – каменистость почвы ($\beta = -0,43, -0,38$ и $-0,36$) и проективное покрытие травянистого покрова ($\beta = -0,40, -0,44$ и $-0,45$). Положительное влияние относительной влажности атмосферного воздуха для частиц 0,3 и 0,5 мкм ($\beta=0,33$ и $0,31$) и средней скорости ветра для частиц 2,5 мкм ($\beta=0,27$) выражено слабее. Концентрация частиц размером 1 мкм связана с более широким набором факторов: наибольший положительный вклад с разной степенью влияния вносит количество песка и пыли различных фракций в верхнем горизонте почвы (мелкий песок ($\beta=40,9$), крупная пыль ($\beta=22,7$), средний и крупный песок ($\beta=19,1$), ил ($\beta=10,9$), средняя и мелкая пыль ($\beta=8,5$ и $8,1$)). Менее выражено влияние крутизны склона, каменистости и плотности почвы, проективного покрытия древесного и травянистого покрова и средней скорости ветра. Для более крупных частиц 5 и 10 мкм соотношение влияющих факторов меняется, и основной вклад вносят крутизна склона, каменистость почвы, проективное покрытие травянистого покрова, количество ила в верхнем горизонте почвы, для частиц размером 10 мкм – также и средняя скорость ветра.

На высоте 1,5 м сохраняется преобладающее положительное влияние количества ила в верхнем горизонте почвы на увеличение концентрации частиц размером 0,3; 1,0; 2,5 и 5 мкм. Значительное отрицательное влияние оказывает проективное покрытие травянистого покрова, причем для частиц размером 2,5 и 5 мкм – этот параметр вносит наи-

большой вклад. Влияние каменистости почвы, крутизны склона и относительной влажности атмосферного воздуха на данной высоте выражено преимущественно для частиц размером 0,3 мкм. С увеличением высоты (2 м от поверхности земли) соотношение влияющих факторов несколько меняется и преобладающее положительное влияние на изменение концентрации частиц 0,3 и 0,5 мкм оказывает крутизна склона, а для частиц размером 1 мкм – количество песка и пыли различных фракций в верхнем горизонте почвы (β от 7,3 до 39,2). Для более крупных частиц 5 и 10 мкм на высотах 1,5–2 м не удалось выявить достоверной зависимости. Интересно отметить, что не выявлено какой-либо достоверной связи с индексом SAVI. В данном случае проективное покрытие растительного покрова, определенное в полевых условиях, оказывается более значимым фактором.

Выводы:

- почти во всех типах почв Приольхонья отсутствует или содержится очень малое количество водопроходной структуры. В условиях постоянной антропогенной нагрузки происходит возрастание количества наиболее эрозионно опасных частиц диаметром менее 0,5 мм. В результате дефляции механический состав почв изменяется на одну или две градации в сторону опесчанивания;

- на сегодняшний день именно наземный транспорт является самым сильным фактором, повышающим интенсивность денудации в Приольхонье. Линейная эрозия развивается в большинстве случаев по дорогам, проложенным по тальвегам древней ложинно-ложбинной сети. Легкий субстрат и разреженный растительный покров преопределяют ее активизацию;

- на следующем этапе исследования и оценки денудации целесообразно добавить наблюдения за гравитационно-склоновыми и криогенно-склоновыми процессами перемещения вещества;

- методики, применяемые для оценки ветровой эрозии, очень трудоемки и не дают абсолютных значений потерь почвы в результате эрозионных процессов.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (АААА-А17-117041910167-0, АААА-А17-117041910169-4 и АААА-А17-117041910171-7) при финансовой поддержке РФФИ (№ 17-05-00588) и РГО (№ 17-05-41020 РГО-РФФИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонов Б.П. Экзолигодинамика Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.
- Агафонов Б.П. Ветровой литопоток из озера Байкал // Доклады РАН. 2002. Т. 382. № 5. С. 688–691.
- Баженова О.И., Любцова Е.М., Рыжов Ю.В., Макаров С.А. Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1998. 201 с.
- Баженова О.И. Сибирская школа экспериментальной геоморфологии // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 23–32.
- Будз М.Д., Тржцинский Ю.Б. Выветривание. Инженерная геология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. С. 90–94.
- Вантеева Ю.В. Факторальная структура и природные функции прибрежных геосистем Прибайкалья: автореф. дис ... канд. геогр. н. Иркутск: ИГ СО РАН, 2018. 24 с.
- Золотарев Г.С. Современные задачи инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания // Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания. [Сб. науч. тр.]. М., 1971. С. 4–25.
- Керженцев А.С., Майснер Р., Демидов В.В., Олеш Г., Сухановский Ю.П., Волокитин М.П., Кистнер И., Коломийцев Н.В., Роде М., Сон Б.К., Быховец С.С., Демин Д.В., Пискунов А.Н., Ильина Т.А., Киселева О.Е. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна. М.: Наука, 2006. 224 с.
- Лисецкий, Ф.Н. Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
- Опекунова М.Ю., Макаров С.А. Оценка опасных геологических процессов при рекреационно-туристской деятельности в Прибайкалье (Иркутская область) // Современные проблемы сервиса и туризма. Научно-практический журнал. Том 12. № 3. 2018. С. 121–132.
- Пеллинен В.А., Козырева Е.А. Коэффициент выветрелости горных пород как показатель устойчивости геологической среды (на примере острова Ольхон) // Тр. XXVIII Всерос. молодежной конф. «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск: ИЗК СО РАН, 2019. С. 126–127.
- Трофимова И.Е. Типизация и картографирование климатов Байкальской горно-котловинной системы // География и природные ресурсы. 2002. № 2. С. 53–61.
- Семенов Ю.М., Антипов А.Н., Буфал В.В. и др. Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Ольхонский район. Иркутск: Издательство Института географии СО РАН, 2004. 147 с.
- Grismer M.E. Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *California Agriculture*. 2012, vol. 66, no. 3, p. 102–107.
- Hai C.X., Liu B., Zhao Y., Du P.F., Yuan X.Y., Jiang H.T., Zhou R.R., Wang J. A New Instrument for Testing Wind Erosion by Soil Surface Shape Change. *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2009, p. 1–3. DOI:10.1155/2009/491570.
- Znamenskaya T.I., Vanteeva Yu.V., Solodyankina S.V. Factors of the Development of Water Erosion in the Zone of Recreation Activity in the Ol'khon Region. *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 2, p. 228–235.
- Электронные ресурсы
- Grismer M.E. Rainfall Simulation Studies – A Review of Designs, Performance and Erosion Measurement Variability, 2011. [Электронный ресурс]: URL: <http://docplayer.net/43734657-Rainfall-simulation-studies-a-review-of-designs-performance-and-erosion-measurement-variability.html> (дата обращения 30.04.2013).
- Webb N., Herrick J., Van Zee J., Hugenholtz C., Zobeck T., Okin G., Standard Methods for Wind Erosion Research and Model Development, 2015. [Электронный ресурс]: URL: <https://winderosionnetwork.org/files/NetworkManual.pdf> (дата обращения 15.05.2017).

Поступила в редакцию 09.01.2019

После доработки 20.09.2019

Принята к публикации 01.11.2019

S.V. Solodyankina¹, T.I. Znamenskaya²,
Yu.V. Vanteeva³, M.Yu. Opekunova⁴

EXPERIMENTAL STUDIES OF WATER EROSION
AND DEFLATION IN STEPPE LANDSCAPES OF THE PRIOL'KHONIE

A number of quantitative characteristics of water erosion and deflation processes has been obtained as a result of 2015–2018 field experimental studies within the Priol'khonie steppe landscapes. The amount of transferred particles and their characteristics were determined. Necessary data for statistical analysis of factors influencing the erosion processes were collected.

Key words: experiment, erosion processes, mass transfer accounting, recreation impact, statistical analysis

Acknowledgements. The work was carried out with financial support of state assignment (AAAA-A17-117041910167-0, AAAA-A17-117041910169-4 и AAAA-A17-117041910171-7) the Russian Foundation for Basic Research (project № 17–05–00588) and the Russian Geographical Society (17–05–41020 РГО–РФФИ).

¹ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Theoretical Geography Laboratory, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: solodyankinasv@mail.ru

² V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Laboratory of Geochemistry of Landscapes and Geography of Soils, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: tiznam@mail.ru

³ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Theoretical Geography Laboratory, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: ula.vant@mail.ru

⁴ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Geomorphology Laboratory, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: opekunova@irigs.irk.ru

REFERENCES

- Agafonov B.P. Vetrovoj litopotok iz ozera Bajkal [Wind lithoflow from the Baikal Lake]. *Doklady RAN*, 2002, vol. 382, no. 5, p. 688–691. (In Russian)
- Agafonov B.P. Jekzolitodinamika Bajkal'skoj riftovoj zony. [Exolithodynamics of the Baikal Rift Zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 176 p. (In Russian)
- Bazhenova O.I. Sibirskaja shkola jeksperimental'noj geomorfologii [The Siberian school of experimental geomorphology]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, no. 2, p. 23–32. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-2(23-32). (In Russian)
- Bazhenova O.I., Lyubtsova E.M., Ryzhov Yu.V., Makarov S.A. Prostranstvenno-vremennoj analiz dinamiki jerozionnyh processov na juge Vostochnoj Sibiri [The space-time analysis of dynamics of erosion processes in the south of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998, 201 p. (In Russian)
- Budz M.D., Trzhtsinsky Yu.B. Vyvetrivanie. Inzhenernaja geologija Pribajkal'ja [Weathering. Engineering geology of the Baikal region]. Moscow, Nauka Publ., 1968, p. 90–94. (In Russian)
- Grismer M.E. Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *California Agriculture*, 2012, vol. 66, no. 3, p. 102–107.
- Hai C.X., Liu B., Zhao Y., Du P.F., Yuan X.Y., Jiang H.T., Zhou R.R., Wang J.A. New Instrument for Testing Wind Erosion by Soil Surface Shape Change. *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2009, p. 1–3. DOI:10.1155/2009/491570.
- Kerzhentsev A.S., Maysner R., Demidov V.V., Ollesh G., Sukhanovsky Yu.P., Volokitin M.P., Kistner I., Kolomytsev N.V., Rod M., Dream B.K., Bykhovets S.S., Dyomin D.V., Piskunov A.N., Ilyina T.A., Kiselyova O.E. Modelirovanie jerozionnyh processov na territorii malogo vodosbornogo bassejna [Modeling of erosion processes within a small water catchment basin]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 224 p. (In Russian)
- Liseckij F.N., Svetlichnyj A.A., Chernyj S.G. Sovremennye problemy eroziovedeniya [Modern issues of erosion science]. Belgorod, Konstanta Publ., 2012, 456 p. (In Russian)
- Opekunova M.Yu., Makarov S.A. Otsenka opasnykh geologicheskikh protsessov pri rekreatsionno-turistskoi deyatel'nosti v Pribaikal'e (Irkutskaya oblast') [Assessment of dangerous geological processes in course of recreational and touristic activities in the Baikal region (the Irkutsk region)]. *Sovremennye problemy servisa i turizma*, 2018, vol. 12, no. 3, p. 121–132. (In Russian)
- Pellinen V.A., Kozyreva E.A. Koefficient vyvetrelosti gornyh porod kak pokazatel' ustojchivosti geologicheskoy sredy (na primere ostrova Ol'hon) [The coefficient of rock weathering as an indicator of the stability of geological environment (case study of the Olkhon Island)] *Proc. of the XXVIII Russian Youth Conf. «Stroenie litosfery i geodinamika»* [The structure of the lithosphere and geodynamics], Irkutsk, Institute of the Earth's Crust Publ., Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019, p. 126–127. (In Russian)
- Semyonov Yu.M., Antipov A.N., Bufal V.V. et al. Ekologicheski orientirovannoe planirovanie zemlepol'zovaniya v Bajkal'skom regione. Ol'khonskii raion [Environmentally-focused planning of land use in the Baikal region. The Olkhon district]. Irkutsk, Institute of Geography Publ., Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2004, 147 p. (In Russian)
- Trofimova I.E. Tipizacija i kartografirovanie klimatov Bajkal'skoj gorno-kotlovinnoj sistemy [Typification and mapping of climates of the Baikal mountain-depression system]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2002, no. 2, p. 53–61. (In Russian)
- Vanteeva Yu.V. Faktoral'naja struktura i prirodnye funkciony pribrezhnyh geosistem Pribajkal'ja [Factorial structure and natural functions of coastal geosystems of the Baikal region]. PhD Thesis in Geography, Irkutsk, Institute of Geography Publ., 2018, 24 p. (In Russian)
- Znamenskaya T.I., Vanteeva Yu.V., Solodyankina S.V. Factors of the Development of Water Erosion in the Zone of Recreation Activity in the Ol'khon Region. *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 2, p. 228–235.
- Zolotarev G.S. Sovremennye zadachi inzhenerno-geologicheskogo izucheniya processov i kor vyvetrivaniya [Modern problems of engineering-geological study of weathering processes and crusts]. *Voprosy inzhenerno-geologicheskogo izucheniya processov i kor vyvetrivaniya* [Questions of engineering-geological study of weathering processes and crusts]. Moscow, 1971, p. 4–25. (In Russian)
- Web sources*
- Grismer M.E. Rainfall Simulation Studies – A Review of Designs, Performance and Erosion Measurement Variability, 2011 [Elektronnyi resurs]: URL: <http://docplayer.net/43734657-Rainfall-simulation-studies-a-review-of-designs-performance-and-erosion-measurement-variability.html> (access date 30.04.2013).
- Webb N., Herrick J., Van Zee J., Hugenholtz C., Zobeck T., Okin G. Standard Methods for Wind Erosion Research and Model Development, 2011 [Elektronnyi resurs]: URL: <https://winderosionnetwork.org/files/NetworkManual.pdf> (access date 15.05.2017).

Received 09.01.2019

Revised 20.09.2019

Accepted 01.11.2019