

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4(575.32)

### ВЛИЯНИЕ ИРРИГАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ НА ДЕГРАДАЦИЮ ПОЧВ РЕЧНЫХ ДОЛИН В ВЫСОКОГОРНОМ ПОЯСЕ ПАМИРА\*

© 2015 г. В. Н. Голосов<sup>1,3</sup>, П. М. Сосин<sup>2</sup>, В. Р. Беляев<sup>3</sup>, Б. Вольфграмм<sup>4</sup>, Ш. И. Ходжаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, 420008, Казань, Кремлевская ул., 18

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт почвоведения Академии сельскохозяйственных наук  
Республики Таджикистан, 734025, Душанбе, пр. Рудаки-21А

<sup>3</sup>Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы  
e-mail gollosov@rambler.ru

<sup>4</sup>Центр развития и окружающей среды, Бернский Университет, СН-3012, Халлерштрассе, 10, Берн, Швейцария  
Поступила в редакцию 26.09.2013 г.

Анализируются результаты исследования пахотных высокогорных каменистых почв долин р. Гунта и верховьев р. Пяндж, расположенных в различных частях Западного Памира. Физико-химические свойства почв были исследованы набором традиционных методов, тогда как темпы деградации почвенного покрова были определены с использованием радиоцезиевого метода. Выявлено низкое содержание гумуса (<2.5%) и питательных веществ в почвах исследованных днищ речных долин, что в первую очередь связано с естественными условиями почвообразования. Лимитирующую роль играют температурный режим и количество атмосферных осадков. Ирригационная эрозия, проявляющаяся при уклонах поливной борозды >2°–3°, является основным антропогенным фактором деградации почв. Более низкое содержание гумуса в почвах долины р. Пяндж обусловлено большим распространением поливных борозд с уклонами >3°, при которых темпы ирригационной эрозии достигают максимальных значений, превышающих 30 т/га в год.

**Ключевые слова:** высокогорные почвы, Западный Памир, <sup>137</sup>Cs, деградация, ирригационная эрозия.

**DOI:** 10.7868/S0032180X15010050

#### ВВЕДЕНИЕ

Внимание к изучению почв высокогорных территорий в последние десятилетия возрастает в связи с их особой чувствительностью к климатическим изменениям, которые наиболее отчетливо проявляются в поясе гор на высотах свыше 2500 м. При этом основное внимание уделяется вопросам почвообразования и классификации почв [6, 7, 16, 17]. В то же время почвы высокогорий, особенно сформированные в днищах речных долин, активно используются в земледелии и являются основой для производства продуктов питания для местного населения и кормов для домашних животных. В этой связи весьма важно оценить влияние длительного использования высокогорных почв в сельскохозяйственном производстве на их плодородие. Одним из таких регионов является Памир. Горы Памира занимают почти половину территории Таджикистана на площади 25700 км<sup>2</sup>, из которых только 240 км<sup>2</sup> относятся к пахотным землям, что составляет менее 1%. Практически вся пашня расположена в днищах речных долин в высотном поясе 1700–3500 м над ур. м. и только незначительная часть находится на бортах долин,

преимущественно на террасах флювиогляциального и озерно-ледникового происхождения. В большинстве долин сельскохозяйственное производство началось не более 200 лет назад. Исключением является Ишкашимский р-н, расположенный на самом юге, где днище долины р. Пяндж было освоено уже 2100–2300 лет назад. Наиболее зависимым от климатических колебаний является высокогорный пояс, располагающийся на высотах свыше 2600 м, где в условиях засушливого короткого лета большая часть пашни является поливной, так как только при условии регулярного полива можно получать урожай сельскохозяйственных культур. В течение последних 40 лет в высокогорном поясе Памира изменения свойств почв на обрабатываемых землях практически не исследовались. Большая часть пастбищных земель располагается на крутых склонах горных хребтов, где преобладают маломощные щебнистые почвы, сильно деградирующие при перевыпасе скота.

Целью настоящего исследования является оценка современного состояния и темпов деградации за последние 50 лет обрабатываемых почв двух районов высокогорного Памира.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке программы PALM и МАГАТЭ.

Таблица 1. Основные климатические характеристики Западного Памира [20, 21]

Названия метеостанций и постов	Высота, м	Средняя годовая температура воздуха	Средняя $t^\circ$ периода со среднемесячными плюсовыми температурами	Сумма $t > 10^\circ$ $t > 5^\circ$	Сумма $t > 10^\circ$ на $1^\circ$ $t > 5^\circ$ средней температуры теплого периода	Осадки за год, мм	Средняя годовая влажность воздуха, %	Средняя продолжительность безморозного периода, сутки
Хумраги	1737	12.1	16.5	$\frac{4140}{4449}$	$\frac{251}{270}$	238	44	247
Рохарв (Ванч)	1751	9.9	14.4	$\frac{3562}{3862}$	$\frac{247}{268}$	232	53	207
Поймазор	2420	—	—	—	—	610	—	—
Рушан	1981	9.6	14.0	$\frac{3458}{3763}$	$\frac{147}{269}$	262	46	203
Хорог	2075	7.7	13.5	$\frac{3377}{3665}$	$\frac{250}{271}$	257	48	206
Шарип-дара	2300	—	—	—	—	286	—	—
Чартым	3157	—	—	—	—	231	—	—
Ишкашим	2524	6.9	11.3	$\frac{2709}{3022}$	$\frac{240}{267}$	119	43	177
Джаушан-гоз	3410	-2.0	7.6	$\frac{805}{1310}$	$\frac{106}{172}$	177	51	30

### КЛИМАТ ПАМИРА КАК ЛИМИТИРУЮЩИЙ ФАКТОР ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ

Памир находится в восточной части зоны средиземноморского типа климата, простирающегося с запада на восток Евразийского континента. Климат формируется под влиянием западных теплых и влажных воздушных масс и холодных сухих северо-восточных Сибирских антициклонов. Значительное влияние на климат оказывает орография и высота местности, определяющие местную циркуляцию воздушных масс. Памир в целом относится к территории с аридным климатом. Аридизация климата и развитие континентального климата на Памире начались в среднем плейстоцене. На это указывают данные палинологических исследований [18] межледниковых озерных отложений. В нижней пачке этих отложений, относимых Васильевым [5] к среднеплейстоценовым, обнаружено значительное количество пыльцы древесных растений, при этом преобладает пыльца хвойных (*Cedrus*, *Pinus*, *Picea*). Но уже в верхней пачке отложений количество пыльцы древесных растений существенно уменьшается, при соответствующем увеличении доли травянистых растений. Начало аридизации климата в среднем плейстоцене обусловлено поднятием горных систем с юга (Гиндукуш, Каракорум), явившихся барьером для проникновения

Индийского муссона. За это время Памир поднялся на 2–2.5 км [24].

Климатические условия играют важнейшую роль, как в почвообразовании, так и в сельскохозяйственном использовании земель на конкретной территории. На Памире наблюдается широкий диапазон изменения количества атмосферных осадков, среднегодовой температуры воздуха и суммы эффективных температур [20, 21] (табл. 1). С увеличением высоты среднегодовая температура уменьшается от 12.1 до  $-2.0^\circ\text{C}$ , а средняя температура теплого периода от 16.5 до  $7.6^\circ\text{C}$ . Это свидетельствует о возможности выращивания зерновых культур (в основном на зеленую массу) на высотах до 3400 м, где сумма активных температур  $>5^\circ\text{C}$  составляет 1310 $^\circ\text{C}$ . Но на этих высотах резко уменьшается продолжительность безморозного периода — до 30 дней. Особенностью Памира является то обстоятельство, что он со всех сторон окружен другими горными массивами, что препятствует проникновению влажных воздушных масс. Наиболее значительные осадки отмечаются на северо-западе Памира с постепенным сокращением по направлению к юго-востоку. Для ряда территорий Памира, обеспеченных данными длительных метеорологических наблюдений, видна прямая корреляция между высотой местности и суммарными годовыми осадками. К таким районам относятся северо-запад Пами-

ра, а также участок долины р. Пяндж между Хорогом и Калайкумом, где река течет строго с юга на север, а также для правобережных притоков р. Пяндж, текущих с востока на запад и впадающих в него на этом же участке. Максимум осадков отмечается в истоках этих долин, где они практически вдвое превышают количество осадков, выпадающих в низовьях притоков [21]. На остальной территории Памира количество атмосферных осадков меньше зависит от высоты местности и в основном обуславливается орографией. Так, примерно на одних и тех же высотах в Ишкашимском р-не, располагающемся на юге Памира, количество осадков в пять раз меньше чем в Поймазоре, расположенном на севере. В основном, среднегодовое количество осадков находится в пределах 231–262 мм. Осадки выпадают преимущественно в зимне-весенний период, что составляет 80% от годовой суммы. Обычно в Хороге в год выпадает один дождь со слоем осадков >20 мм, тогда как в Ишкашиме, на самом юге Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО), раз в год выпадает дождь со слоем 10 мм при максимальной интенсивности дождя <0.1 мм/мин [21]. Поэтому ни талый, ни ливневой смыв не наблюдаются по долинам рек Памира, где собственно и располагаются массивы пахотных земель. Согласно данным метеорологических наблюдений, в последние десятилетия на Западном Памире общее количество осадков возросло на 25% по сравнению с серединой XX в., но сократилось на 25–50% на Восточном Памире за тот же период времени [22].

Аридность климата определяет низкую относительную влажность воздуха – 43–53%. В разных частях Западного Памира наблюдается не однотипное изменение температуры воздуха с высотой. Средний градиент изменения среднегодовой температуры составляет 0.8°C на 100 м высоты с колебаниями от 0.4 до 1.0°C. Наименьший градиент наблюдается на отрезке Хорог–Ишкашим как по среднегодовой температуре, так и по суммам температур >0, >5, >10°C. Это указывает на более теплые климатические условия южной части Западного Памира. Однако и здесь орография играет значительную роль в изменении тренда температур. С севера на юг Западного Памира происходит сдвиг климатических поясов вверх. Средняя максимальная температура почвы на Западном Памире в июле находится в пределах 58°–63°C, а средняя минимальная – 11°–16°C. Ишкашимский район отличается интенсивным ветровым режимом.

Рельеф и климатические условия по существу определяют возможности ведения сельского хозяйства на Памире, особенно в высотном поясе 2600–3500 м над ур. м. Из-за сухости климата и продолжительных зим процессы почвообразования протекают достаточно медленно. Почвы Памира изучались многими исследователями [1, 12–

14, 28]. Почвы региона маломощные и слабогумусированные [11, 15]. Последнее детальное почвенное картирование в масштабе 1 : 10000 на Памире проводилось в 1970-е годы институтом “Тадгипрозем” [15]. Был определен тип почв, их гранулометрический состав, содержание гумуса и питательных веществ. На основе использования почвенно-морфологического метода были выделены несмытые, слабо-, средне- и сильносмытые варианты. Сравнительно недавно предложена классификация почв, разработанная Чербарем [27], для Западного Памира. Авторами настоящего исследования получены новые данные о состоянии почвенного покрова почв днищ речных долин в высотном поясе 2600–3400 м над ур. м., выявлены причины и темпы деградации земель.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Количественная оценка современного состояния почв и темпов их деградации проводилась в днищах долин среднего течения р. Гунт (Шунганский р-н ГБАО) и верхнего течения р. Пяндж (Ишкашимский р-н ГБАО) (рис. 1). Выбор данных участков объясняется их расположением в высотном поясе 2600–3400 м и различиями в почвенном покрове. Именно в пределах данных высот климатические изменения наиболее серьезно влияют на продуктивность почв, а деградация почв, обусловленная неграмотным ведением сельскохозяйственного производства, в еще большей мере снижает их плодородие [36].

Река Гунт является правым притоком р. Пяндж и протекает с востока на запад, впадая в р. Пяндж в районе г. Хорог. В течении плейстоцена долина реки была занята ледником, после таяния которого образовалась система озер, сформировавшихся выше по течению от конечно-моренных гряд. После естественного спуска озер в связи с прорезанием речным потоком валов конечно-моренных гряд и одновременного врезания русла реки в озерные отложения, бывшие днища озер стали речными террасами, которые в настоящее время и являются основными сельскохозяйственными землями. Поступающий со склонов долины и из притоков обломочный материал формирует конуса выноса и шлейфы, частично перекрывающие террасы и, в свою очередь, также частично используемые в качестве пахотных земель. Исследования почвенного покрова в днище долины р. Гунт проводились на высотах 3000–3400 м над ур. м. В данном высотном поясе в днище долины р. Гунт и ее притоков преобладают высокогорные темно-бурые полупустынные почвы [12, 27]. Территория характеризуется суммой эффективных температур 900–2000°C, годовое количество осадков составляет 300–400 мм при коэффициенте увлажнения 0.3–0.5.

Исследованный участок днища долины р. Пяндж находится на высотах свыше 2600 м

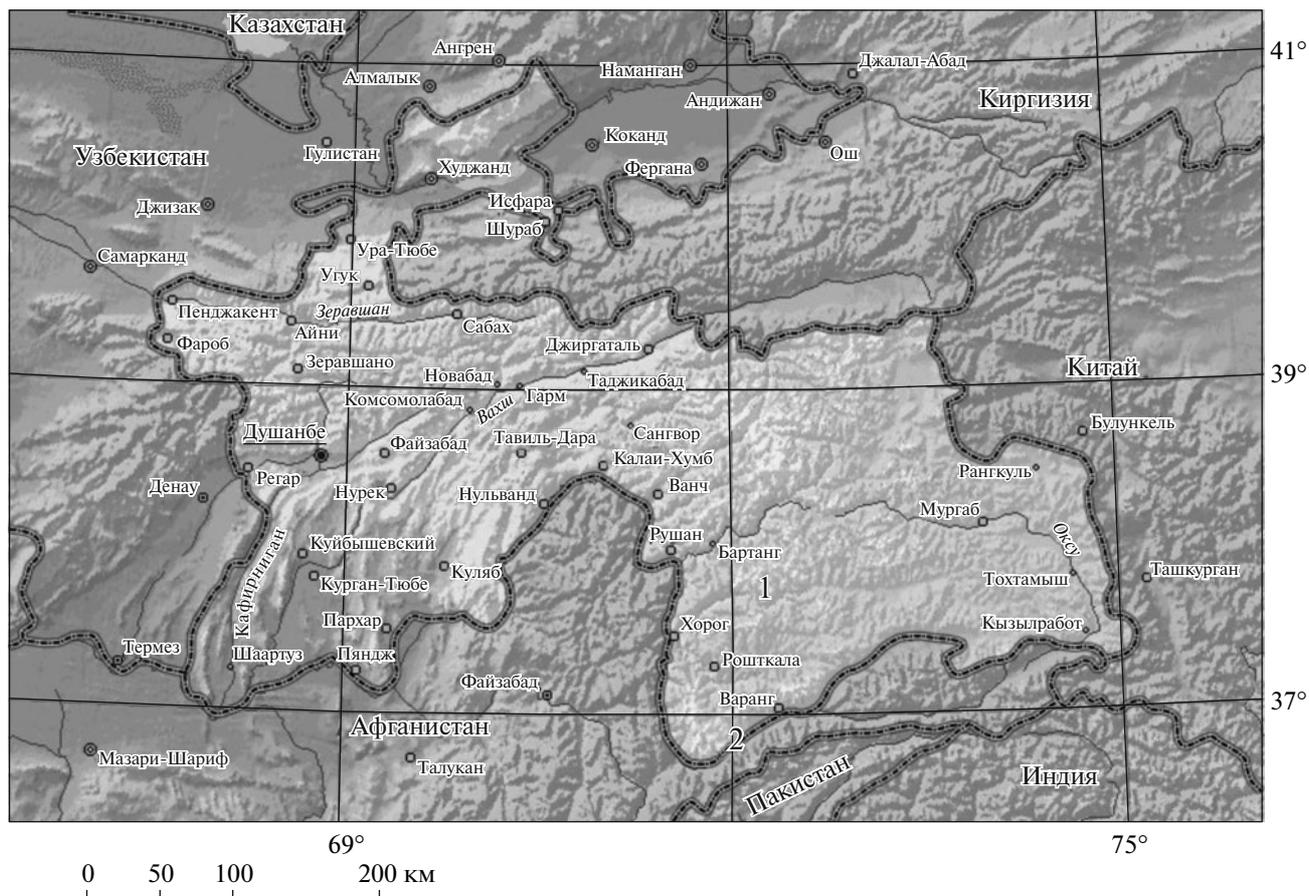


Рис. 1. Расположение объектов исследований в пределах Таджикистана: 1 — долина р. Гунт, 2 — долина р. Пяндж.

над ур. м. между населенными пунктами Даршай и Шитхавр. Здесь в днище долины распространены горные серо-палевые пустынные почвы, располагающиеся в высотном поясе 2400–3000 м [12, 27]. Для данного высотного пояса сумма эффективных температур составляет 2000–3100°С, годовое количество осадков незначительное — 100–130 мм при коэффициенте увлажнения 0.07–0.10. Обрабатываемые земли занимают первую цокольную аллювиальную террасу, сложенную преимущественно отложениями ледникового происхождения и перекрытую многочисленными пролювиальными конусами. Местами пашня располагается и на бортах долины, а также на фрагментах более древних ледниковых террас, расположенных на значительной высоте над современным урезом р. Пяндж.

Преобладающая площадь пахотно-пригодных земель исследуемых районов орошается. Используется метод полива по бороздам. Полив производится каждым собственником земельного надела без всякого соблюдения поливных норм. Особенности орошения каменистых почв ранее исследовалась как в полевых условиях [2, 22, 25, 26, 29], так и в процессе проведения лабораторных экспе-

риментов с целью оценки противоэрозионной стойкости почв для разработки модели прогноза ирригационной эрозии [3, 4]. Основными возделываемыми культурами на орошаемых землях являются зерновые (пшеница, ячмень) и картофель, а там где позволяет температура — сады плодовых деревьев. На части пашни, в основном в днище долины р. Гунт, высеваются многолетние травы. Под скудные выпасы и сенокосы используются крутые склоны долин, на которых распространены очень сильнокаменистые маломощные почвы [12, 27].

В комплекс исследований входило изучение физико-химических свойств почвенного покрова на целинных и пахотных участках, включая изучение pH, гранулометрического состава почв, водопроницаемости, содержания гумуса, питательных веществ (фосфора и калия) и карбонатов. Гранулометрический состав почв оценивался методом Качинского, содержание гумуса — методом Тюрина, объемный вес — методом режущего кольца, водопроницаемость — методом рам. Для этого использовались два кольца диаметром 60 и 20 см. Содержание в почве  $P_2O_5$  определялось методом Мачигина, а  $K_2O$  — на пламенном фотометре.

Радиоцезиевый метод применялся для оценки темпов перераспределения почв на пашне. Этот метод широко используется в различных регионах мира для оценки темпов смыва и аккумуляции наносов [8, 30–32, 34, 37, 40, 44]. Метод основан на использовании в качестве трассера изотопа цезия-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), имеющего антропогенное происхождение. Его происхождение связано с началом проведения ядерных взрывов в открытой атмосфере в начале 1950-х годов одновременно СССР и США. В момент взрыва, являющийся одним из продуктов распада изотоп  $^{137}\text{Cs}$ , поступал в стратосферу, откуда постепенно при образовании кучевой облачности поступал в атмосферу и далее при выпадении осадков на поверхность Земли. При выпадении на поверхность почвы  $^{137}\text{Cs}$  быстро и прочно фиксировался на почвенных частицах и в дальнейшем перемещался только совместно с ними [8, 10]. Основной принцип метода основан на оценке изменений суммарных запасов изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в опробываемых точках относительно его запасов на опорном участке, под которым понимается участок с отсутствием процессов смыва-намыва. Основное выпадение изотопа  $^{137}\text{Cs}$  глобального (или как принято в зарубежной литературе, “бомбового”) происхождения происходило в период с 1954 до начала 1980 гг. с основным максимумом в 1963 г. [19]. После подписания соглашения о запрещении проведения взрывов в открытой атмосфере в 1963 г. выпадения  $^{137}\text{Cs}$  постоянно сокращались. Помимо глобальных в различных регионах мира происходили выпадения  $^{137}\text{Cs}$  из атмосферы в связи с техногенными авариями. Особенностью данных выпадений является их большая неравномерность и гораздо меньший охват по площади. Основное ограничение данного метода состоит в высокой вариабельности начального выпадения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в отдельных регионах [9, 39, 41]. В тех случаях, когда она превышает 20–25%, использовать данный метод для количественной оценки темпов перераспределения наносов не рекомендуется. Для горных районов с высокой контрастностью слоя осадков установлена корреляция между начальным выпадением изотопа  $^{137}\text{Cs}$  и высотой над уровнем моря [31]. Поэтому для горных территорий необходимо выбирать опорные участки для определения начального выпадения изотопа в том же диапазоне абсолютных высот, в котором находится объект исследования.

На опорных участках и на пахотных землях, в пределах которых проводились исследования темпов перераспределения наносов, отбор интегральных проб проводился цилиндрическим пробоотборником с внутренним диаметром 20 см из слоя 0–25 см в трехкратной повторности в каждой точке отбора. Дополнительно на участках возможной аккумуляции наносов отбирался образец из горизонта 25–35 см. На опорных участ-

ках дополнительно послойные образцы почвы были отобраны из разреза с фиксированной площади через 5 см до глубины 35 см с целью определения эпюры вертикального распределения изотопа и глубины его проникновения в нижние горизонты почвы.

Подготовка и анализ проб на содержание  $^{137}\text{Cs}$  проводились в Почвенном институте АСХН Республики Таджикистан. Подготовка проб для проведения гамма-спектрометрического анализа включала сушку при температуре  $105^\circ\text{C}$  и измельчение образца до фракции  $<0.75$  мм. Анализ проводился на гамма-спектрометрическом комплексе производства фирмы ORTEC с полупроводниковым коаксиальным детектором высокого разрешения из особо чистого германия с эффективностью 40% (модель GEM-M5970P4-S). Время экспозиции определялось статистически достоверным фиксированием фотопика  $^{137}\text{Cs}$  на линии 661.66 кэВ и изменялось от 10000 до 60000 с. Обработка полученных спектров и расчет активности проводились с использованием программного пакета GammaVision-32.

Для пересчета содержания в почве изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в темпы эрозии и аккумуляции на распахиваемых участках использовалась пропорциональная модель [43]. Модель основана на предположении, что весь запас радионуклида равномерно распределен по всему пахотному горизонту. Расчеты интенсивности смыва почвы или накопления наносов проводились с использованием следующей формулы:

$$R = 10 \times \frac{BZ_p}{\Delta t} \left( \frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right), \quad (1)$$

где  $R$  – интенсивность эрозии/аккумуляции (отрицательное значение соответствует эрозии, положительное – аккумуляции (т/га в год),  $Z_p$  – мощность пахотного горизонта (м),  $B$  – плотность почвы ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $\Delta t$  – продолжительность периода оценки интенсивности эрозии или аккумуляции (годы);  $A$  – запас радионуклида в точке ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ),  $A_{ref}$  – опорное значение запаса  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ), 10 – коэффициент перевода размерности из  $\text{кг}/\text{м}^2$  в т/га.

Продолжительность периода оценки темпов процессов выбиралась с учетом интервала времени, прошедшего с момента максимума выпадения  $^{137}\text{Cs}$  (1963 г.) до момента отбора пробы (2009–2010 гг.).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства почв и их изменения при распашке. Почвы днища долины р. Гунт характеризуются, в основном, легкосуглинисто-супесчаным составом, тогда как для почв долины р. Пяндж более характерен песчано-супесчаный

**Таблица 2.** Гранулометрический состав почв исследуемых речных долин

№ разреза	Глубина, см	Содержание фракций, %						Сумма <0.01
		1.0–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	
Почвы долины р. Гунт, Шугнанский район								
Р-1ф, целина	0–17	23.4	29.8	33.6	6.8	3.2	3.2	13.2
	17–38	19.2	35.8	31.2	4.0	7.6	2.2	13.8
	38–60	25.8	29.2	23.4	6.6	10.6	4.4	21.6
Р-2ф, орошаемая пашня	60–100	12.8	23.8	33.0	9.4	13.0	8.0	30.4
	0–17	23.1	29.9	29.0	6.2	8.2	3.6	18.0
	17–45	19.9	14.1	49.4	5.4	8.6	2.6	16.6
	45–67	22.7	26.7	23.2	10.4	13.4	3.6	27.4
Почвы долины р. Пяндж, Ишкашимский район								
Р-1ф, орошаемая пашня	1–30	8.2	44.4	34.4	5.6	5.6	1.8	13.0
	30–50	17.3	51.4	18.0	4.8	6.4	2.2	11.4
Р-2ф, орошаемая пашня	0–30	6.6	54.96	20.8	6.4	7.2	4.0	17.6
	30–50	25.3	47.7	12.6	2.6	6.2	5.6	14.4
Пр-17, целина	0–30	9.9	52.3	29.8	2.2	3.4	2.4	8.0
	30–50	29.6	51.2	12.8	2.4	2.6	1.4	6.4
Пр-20, целина	0–30	21.4	50.8	20.4	1.6	4.0	1.8	7.4
	30–50	33.1	38.5	19.0	2.6	4.2	2.6	9.4

состав. В целом пахотные орошаемые почвы обладают несколько более тяжелым гранулометрическим составом, чем целинные. В профиле почв не наблюдается закономерности в изменении содержания различных фракций по глубине, а их распределение обусловлено составом почвообразующих пород (табл. 2). Каменистые почвы исследованных участков занимают значительные площади. Причем степень каменистости почв в днище долины р. Пяндж существенно больше, чем в днище долины р. Гунт. Орошаемые земли отличаются меньшей каменистостью и большей мощностью почв по сравнению с целинными почвами. На участках долины р. Пяндж орошаемые и неорошаемые земли представлены в основном маломощными средне- и сильнокаменистыми почвами, подстилаемыми глыбово-валунными отложениями с супесчано-песчаным заполнителем.

Содержание гумуса в высокогорных темно-бурых полупустынных почвах днища долины р. Гунт практически вдвое превышает содержание гумуса в горных серо-палевых пустынных почвах днища долины р. Пяндж. При этом запасы гумуса в каменистых почвах изменяются в широких пределах, сокращаясь пропорционально увеличению степени каменистости (табл. 3).

Карбонатность почв определяется составом почвообразующих пород. На моренных отложениях, обломочный материал которых представлен кислыми породами (граниты, гранитоиды), в днище долины р. Гунт почвы не содержат  $\text{CaCO}_3$ . Лишь в отдельных горизонтах его содержание достигает 1.0%. В днище долины р. Пяндж почвы, формирующиеся на моренах, не содержат карбонаты, тогда как на конусах выноса, сложенных гнейсами, содержание карбонатов находится в пределах 1–5, иногда достигая 9%. В зависимости

от содержания карбонатов изменяется и реакция почв. Высокогорные темно-бурые полупустынные умеренно-холодные почвы обладают более широким диапазоном рН (от 5.8 до 7.8). Горные серо-палевые пустынные умеренно-теплые почвы имеют высокие показатели рН (7.9–9.3), что, видимо, связано с содержанием определенного количества карбоната магния.

Объемная масса пахотного горизонта орошаемых, некаменистых почв в целом по всем участкам находится в пределах 1.03–1.46 г/см<sup>3</sup> при пористости 61.7–45.7%. В средне- и сильноскелетных почвах объемная масса мелкозема гумусового горизонта варьирует от 0.9 г/см<sup>3</sup> (в сильноскелетных) до 1.24 (в среднескелетных). Более низкие величины объемной массы сильноскелетных почв обусловлены наличием пустот, образованных каркасом скелета. В нижних горизонтах почв объемная масса увеличивается до 1.38–1.66 г/см<sup>3</sup> в некаменистых и 1.3–1.40 г/см<sup>3</sup> в скелетно-каменистых почвах. В результате почвы имеют низкую влагоемкость, обусловленную каменистостью, легким гранулометрическим составом и небольшой мощностью.

Плодородие почв, наряду с физическими и химическими свойствами, зависит в значительной степени от ее обеспеченности питательными элементами. В целом, содержание подвижного фосфора и обменного калия в почвах низкое. Так, в слое 0–50 см пахотных почв днища долины р. Гунт в среднем содержится фосфора 19.5 мг/кг, калия – 28 мг/100 г, тогда как в почвах днища долины р. Пяндж среднее содержание фосфора составляет – 6.4 мг/кг, а калия – 19.1 мг/100 г. Процент площадей исследованных участков с разной обеспеченностью фосфором и калием приводится в табл. 4.

Таблица 3. Содержание и запасы гумуса в почвах исследованных участков

Мощность слоя, см	Пределы содержания гумуса	Среднее содержание гумуса	Разброс запасов гумуса	Средний запас гумуса в почвах			
				некаменистых	слабокаменистых	среднекаменистых	сильнокаменистых
		%	т/га				
Долина р. Гунт							
0–30	1.11–3.88	2.49					
30–50	0.67–3.03	1.85					
0–50	0.89–3.45	2.17	61–232	147	110	74	37
0–100	1.22–2.20	1.71	166–299	233			
Долина р. Пяндж							
0–30	0.54–2.01	1.28					
30–50	0.35–1.68	1.00					
0–50	0.44–1.84	1.14	27–114	71	53	36	18
0–100	0.81–1.29	1.10	50–80	65			

Водопроницаемость орошаемых почв в целом высокая и очень высокая и изменяется в интервале от 0.79 до 4.26 мм/мин. Неорошаемые земли характеризуются более широким диапазоном водопроницаемости – от 0.09 до 5.8 мм/мин, что связано с литологическим строением и высокой каменистостью почв. (Полевое определение водопроницаемости выполнено Г.А. Некушовой.)

Оценка темпов деградации пахотных почв на исследуемых участках проводилась на основе использования в качестве маркера содержания в почве изотопа  $^{137}\text{Cs}$ . Для определения начального выпадения изотопа на каждом из исследованных участков выбиралась опорная площадка, в пределах которой предполагалось отсутствие смыва или аккумуляции в период с начала выпадения изотопа  $^{137}\text{Cs}$ , то есть с 1954 г. до момента отбора проб.

Опорная площадка в долине р. Гунт располагалась на ледниковой террасе, на высоте 3000 м над ур. м., и имеющей относительную высоту над урезом реки 25 м. Она представляла собой пастбищный участок с минимальными уклонами. Уклон и длина данного участка незначительны и, таким образом, практически исключено, что здесь мог наблюдаться смыв почвы. Также исключено, что наносы, смытые с какого-либо соседнего склона, могли переотложиться на данном участке, так как он расположен в пределах местной приводораздельной поверхности. Высота данного участка над уровнем моря аналогична высоте исследуемого участка пашни в долине р. Гунт, что также позволяет использовать его в качестве опорного для определения начального выпадения изотопа на данной территории (с учетом описанного выше изменения среднегодового количества осадков и связанного с ним поступления  $^{137}\text{Cs}$  из атмосферы с высотой).

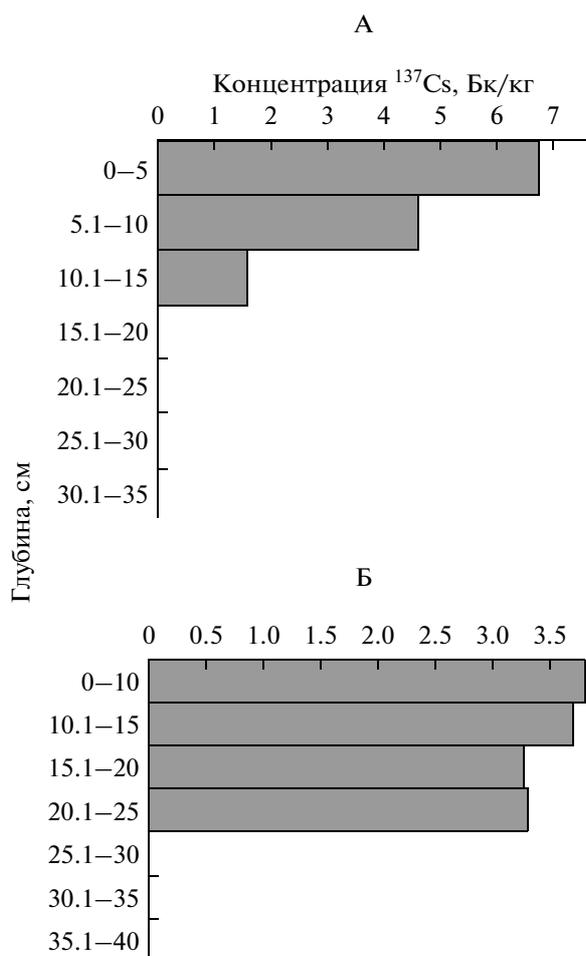
Послойные образцы почвы были отобраны из разреза с фиксированной площади  $10 \times 10$  см через 5 см до глубины 35 см. В нижних горизонтах

резко возросло количество грубообломочных включений различной крупности. Кроме того, в 11 точках были отобраны интегральные образцы фиксированного объема металлическим проботорборником цилиндрической формы из слоя 0–25 см. Причем в каждой точке отбиралось по 3 образца, которые смешивались для получения одного осредненного образца, для которого затем в лаборатории и проводились измерения содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$ . В одной из точек дополнительно были отобраны три образца с глубины 25–35 см с целью выявления доли изотопа  $^{137}\text{Cs}$ , возможно, мигрировавшего на данную глубину. Восемь точек отбора располагались на равном расстоянии друг от друга, составляющем 3 м. Две точки отбора располагались посередине между ранее отобранными по квадрату четыремя точками, а еще одна точка отбора располагалась в стороне на равном расстоянии 2 м от двух других точек отбора.

Опорный участок в днище долины р. Пяндж располагался в кишлаке Даршай на плоском участ-

Таблица 4. Доля (%) площадей исследованных участков пахотных земель с разной обеспеченностью почв питательными элементами

Район	Степень обеспеченности	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$
Шугнанский, долина р. Гунт	Не обеспечены	62	12
	Слабо обеспечены	19	31
	Средне обеспечены	9	27
	Хорошо обеспечены	6	18
	Очень хорошо обеспечены	4	12
Ишкашимский, долина р. Пяндж	Не обеспечены	94	26
	Слабо обеспечены	3	49
	Средне обеспечены	3	11
	Хорошо обеспечены	Нет	6
	Очень хорошо обеспечены	Нет	8



**Рис. 2.** Вертикальное распределение изотопа  $^{137}\text{Cs}$  на опорных площадках, А – долина р. Гунт (ненарушенная почва); Б – долина р. Пяндж (пашня).

ке поливной пашни, окруженном с трех сторон деревьями. В связи с регулярным поливом можно ожидать незначительную эрозию на данном поле, но ее темпы должны быть минимальны в связи с тем, что уклон участка менее 1%. Разрез для послойного отбора образцов располагался в центре поля. Из него послойно было отобрано 7 образцов с площади  $15 \times 15$  см через 5 см по глубине, за исключением первого образца, отобранного с 0–10 см. В 12 расположенных по спирали точках был выполнен отбор интегральных образцов фиксированного объема металлическим пробоотборником цилиндрической формы из горизонта 0–25 см. В каждой точке осредненный образец получался смешиванием проб из трех отдельных уколов пробоотборника, аналогично описанному выше опорному участку в долине р. Гунт.

Вертикальное распределение изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в разрезах исследованных опорных участков представлено на рис. 2. На опорной площадке в долине р. Гунт концентрация изотопа максимальна у поверхности почвы; с глубиной она уменьшается

(рис. 2, А). Это позволяет утверждать, что данный участок не распахивался с момента начала выпадения изотопа  $^{137}\text{Cs}$ . Также отсутствие  $^{137}\text{Cs}$  глобального происхождения на глубине более 15 см характерно и для многих других регионов северного полушария [35, 42]. На опорной площадке в днище долины р. Пяндж изотоп  $^{137}\text{Cs}$  равномерно распространен в пределах пахотного слоя до глубины 25 см. Аналогичное распределение изотопа  $^{137}\text{Cs}$  установлено и для опорных площадок, расположенных на пашне в других регионах [32, 33].

Пространственная вариабельность начального выпадения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  для двух исследованных опорных площадок составила 17% (табл. 5), что соответствует уровням вариабельности, выявленным для других регионов северного полушария [9, 35, 38, 41]. Следует отметить, что различие в среднем содержании изотопа  $^{137}\text{Cs}$  на двух площадках соответствует различиям в среднегодовом количестве осадков между ними. Так как начальная вариабельность выпадения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  не превышает 20%, радиоцезиевый метод можно использовать для оценки темпов перераспределения почв на поливных землях в исследуемых высотных поясах днищ долин рек Гунт и Пяндж.

Для оценки темпов перераспределения наносов на пахотных землях днища долины р. Пяндж было выбрано 3 участка, два из которых располагаются к северу от кишлака Даршай и один – к северу от кишлака Шитхавр. Каждый из участков характеризуется различной конфигурацией склонов. Трансекты для отбора образцов на всех участках ориентировались вдоль направления поливных борозд. Для перехода от содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$  к темпам эрозионно-аккумулятивных процессов использовалась пропорциональная модель [43].

Была выявлена отчетливая зависимость темпов смыва почвы от угла наклона полевой борозды. Средний смыв на участке около кишлака Даршай составил 24 т/га в год, причем максимальные темпы ( $>30$  т/га) наблюдаются на участке с уклонами  $>3^\circ$ . Аналогичная тенденция обнаружена и для сравнительно короткого склона на одном из участков у кишлака Шитхавр, где максимум смыва выявлен в средней части склона, где уклоны  $>3^\circ$  (рис. 3). На каждом из данных участков длина поливных борозд не превышала 45 м.

Совершенно иная картина выявлена на другом участке около кишлака Даршай. Здесь направление поливных борозд в большинстве случаев не совпадает с максимальным падением склона (рис. 4). В результате здесь вдоль борозд наблюдается чередование зон смыва и переотложения материала согласно изменению уклонов. В большинстве случаев уклон вдоль поливной борозды меньше местного уклона поверхности склона, что при общей длине борозд порядка 100 м способствует переотложению значительной части наносов внутри пашни, а суммарный вынос наносов с

данного поля очень близок к нулю. Только в верхнем северо-западном углу поля наблюдается сильный смыв, так как здесь направление поливной борозды совпадает с направлением падения склона, уклон которого  $>3^\circ$  (рис. 4). Дополнительно часть аккумулируемого материала поступает на данный участок благодаря механическому перемещению наносов, переотложившихся в сбросных ирригационных каналах, при их регулярной очистке. Данное предположение подтверждается наличием аккумуляции для всех точек отбора, расположенных на борозде, проходящей по северо-восточному краю поля рядом со сбросным ирригационным каналом.

Оценка темпов перераспределения наносов на пашне в днище долины р. Гунт проводилась на участке рядом с кишлаком Миеншахр. Это типичный участок, состоящий из нескольких небольших пахотных наделов, разделенных ирригационными каналами (арыками), для которых характерно некоторое увеличение уклонов по направлению к руслу р. Гунт. Практически на всех отдельных наделах пашни, за исключением одного, направление поливных борозд совпадает с падением склона, что способствует развитию эрозии. Однако уклоны пашни  $<3^\circ$  (рис. 5). В результате для участков характерно местное перераспределение наносов при темпах смыва в диапазоне 1–24 т/га в год и темпах аккумуляции в интервале 1–27 т/га в год. Закономерно, что участки смыва располагаются в головных (верхних) частях борозд, а зоны аккумуляции тяготеют к средним и нижним частям борозд. В результате суммарный вынос наносов за пределы исследованного участка в целом составляет всего 2 т/га в год (рис. 5).

В целом для пахотных земель днища долины р. Гунт, расположенных на высотах свыше 3000 м над уровнем моря, характерны уклоны  $<3^\circ$ . Это позволяет предположить, что деградация почв в связи с проявлением водной эрозии здесь ничтожно мала. Дополнительным фактором, подтверждающим данное предположение, являются значительные площади пашни под многолетними травами, еще в большей степени предохраняющими почву от размыва даже при неправильном поливе.

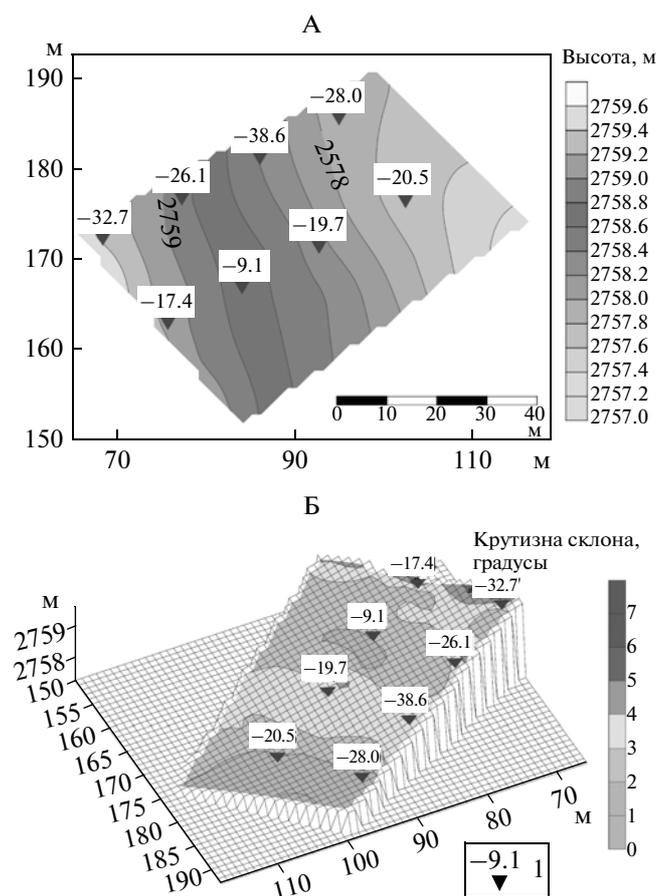
Тем не менее, для ряда участков пашни, занимающих относительно более крутые поверхности конусов выноса притоков, характерны уклоны  $>3^\circ$ . Вероятно, на таких полях темпы ирригационной эрозии сопоставимы с выявленными на участках с аналогичными уклонами, расположенными в днище долины р. Пяндж. Это предположение подтверждается наличием сохранившейся сети промоин в нижних частях склонов у границ пашни и заметно осветленным цветом поверхности почв, указывающим на очень низкое содержание в них гумуса. Полученные результаты о существенно меньшей деградации почвенного покрова

**Таблица 5.** Статистические характеристики вариативности содержания  $^{137}\text{Cs}$  на опорных площадках

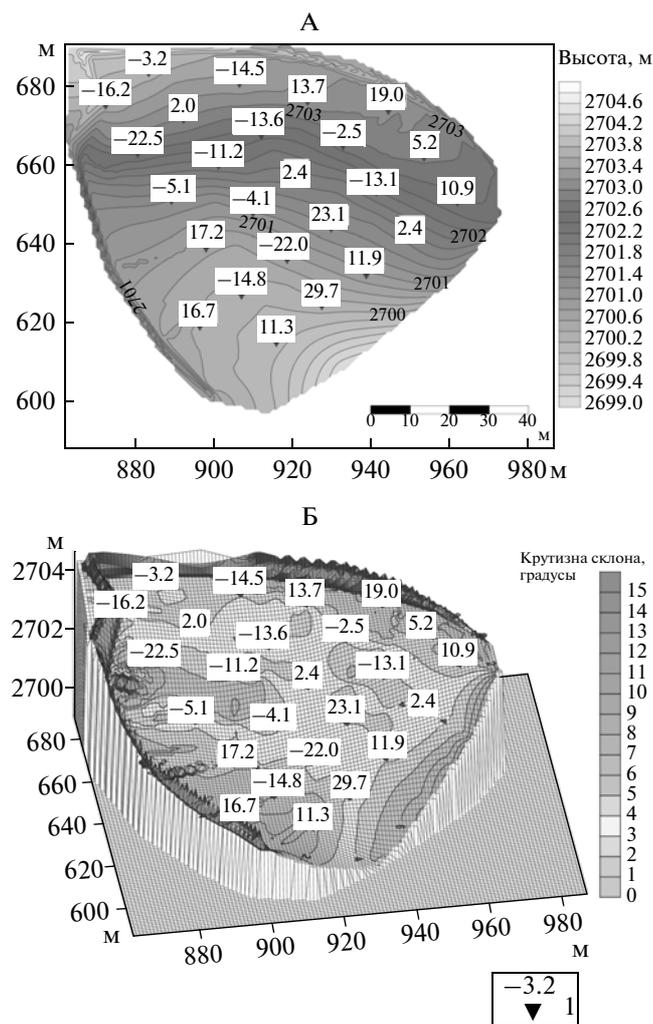
Статистические характеристики	Долина р. Пяндж	Долина р. Гунт
Средние, Бк/м <sup>2</sup>	537	798
Медиана, Бк/м <sup>2</sup>	528	771
Стандартное отклонение, Бк/м <sup>2</sup>	93	136
CV, %	17	17
Стандартная ошибка среднего, Бк/м <sup>2</sup>	±44	±62

вследствие развития эрозионных процессов в днище долины р. Гунт по сравнению с почвами днища долины р. Пяндж объясняют причины различий в содержании гумуса и других питательных веществ в почвах исследованных районов (табл. 4, 5).

Согласно результатам выполненных количественных оценок наиболее сильный смыв (более 30 т/га в год) наблюдаются на поливных землях с

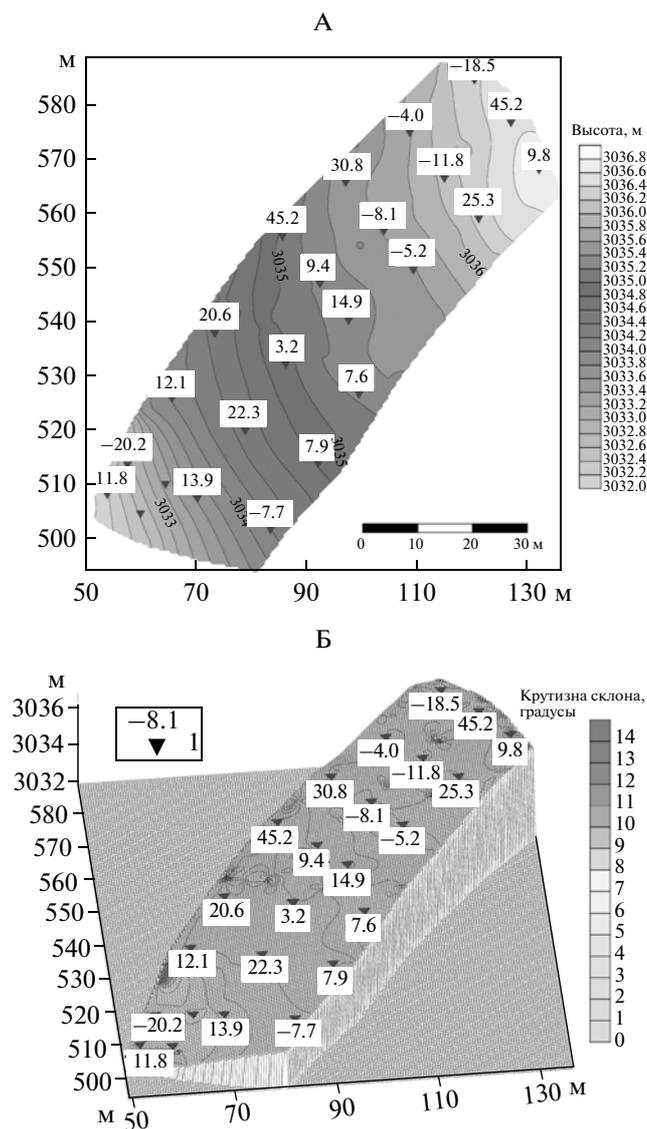


**Рис. 3.** Темпы перераспределения наносов на поливной пашне у кишлака Шитхавр, определенные на основе использования радиоцезиевого метода (А), и карта крутизны склона на тот же участок (Б). Здесь и далее значками показаны точки пробоотбора, расчетные темпы смыва (отрицательные значения) или аккумуляции (положительные значения).



**Рис. 4.** Темпы перераспределения наносов вдоль пяти трансект, расположенных на поливной пашне около кишлака Даршай, рассчитанные на основе использования радиоцезиевого метода (А), и карта крутизны склона на тот же участок (Б).

уклонами  $>3^\circ$  в тех случаях, когда их направление совпадает с уклоном склона, а длина не превышает 50 м. Предполагая неизменную частоту и интенсивность полива, это означает, что за 50 лет регулярного полива было смыто не менее 12 см почвы, что составляет около половины пахотного слоя. При уклонах  $<3^\circ$  потери почвы варьируют в интервале 0–20 т/га в год. При увеличении длины борозды свыше 50 м наблюдается частичная аккумуляция наносов внутри борозд, что несколько снижает долю наносов, выносимых за пределы пашни. Можно утверждать, что ирригационная эрозия является основной причиной деградации почвенного покрова на поливных землях днищ долин Западного Памира, располагающихся на высотах свыше 2600 м. Влияние ветровой эрозии, наблюдающейся в днище долины р. Пяндж, сказывается на деградации пашни на бортах долины.



**Рис. 5.** Темпы перераспределения наносов вдоль трех трансект на поливном участке около кишлака Миеншахр, долина р. Гунт, установленная на основе использования радиоцезиевого метода (А), и карта уклонов данного участка (Б).

При этом пашня днищ долин относительно слабо подвержена ветровой эрозии благодаря наличию защитных древесных и кустарниковых насаждений, а также несколько более устойчивой структуре почвенных агрегатов. Если бы интенсивность ветровой эрозии была более существенной, она скрадывала бы выявленные нами закономерности соотношений между темпами смыва и уклонами поливных борозд, так как обычно при проявлении ветровой эрозии наблюдаются значительные потери почвы на наветренных склонах и аккумуляция материала на подветренных, безотносительно соотношений их уклонов.

В целом, темпы ирригационной эрозии на поливных землях, расположенных в днище долины

р. Пяндж на участке между кишлаками Шитхавр и Даршай, существенно выше по сравнению с участком днища долины р. Гунт в районе кишлака Миеншахр. Это связано с большими уклонами поливных борозд, расположенных преимущественно на конусах выноса. Более высокая степень деградации пахотных почв в днище долины р. Пяндж наглядно подтверждается более низким содержанием гумуса и питательных веществ по сравнению с пахотными почвами днища долины р. Гунт. Почвы днищ долин рек Гунт и Пяндж на высотах свыше 2600 м над ур. м. характеризуются низким плодородием, которое обусловлено, в первую очередь, неблагоприятными климатическими условиями для почвообразования. Избыточный полив пахотных земель, особенно при закладке поливных борозд вдоль склонов с уклонами свыше 3°, способствует развитию интенсивного смыва почв и приводит к вымыванию за пределы почвенного профиля питательных элементов, усугубляя и без того их низкое содержание. Кроме того, высокая фильтрация при существующем бороздковом способе полива и несоблюдении поливных норм, приводит к нерациональной потере воды на инфильтрацию.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пахотные почвы днищ долин рек Гунт и Пяндж в высокогорном поясе Западного Памира содержат в среднем 6.4–19.5 мг/кг фосфора и 19.1–28 мг/100 г калия при среднем содержании гумуса <2.5%, что позволяет сделать вывод об их низком плодородии. Оно обусловлено неблагоприятными для почвообразования климатическими условиями с одной стороны, и плохо контролируемым чрезмерным поливом, способствующим смыву почвенных частиц и питательных веществ, особенно при уклонах поливных борозд свыше 3°, с другой. Как было установлено на основе применения радиоцезиевого метода, среднегодовые темпы смыва при уклонах склонов свыше 3° могут превышать 30 т/га в год. В целом пахотные почвы исследованных участков днища долины р. Пяндж оказались более сильно деградированными по сравнению с почвами днища долины р. Гунт, что обусловлено большими уклонами пахотных склонов днища долины р. Пяндж, так как пашня расположена преимущественно на конусах выноса, тогда как в днище долины р. Гунт — на террасах. При этом климатические условия почвообразования в долине р. Гунт на высотах свыше 3000 м менее благоприятны по сравнению с почвами долины р. Пяндж в высотном поясе 2600–3000 м в связи с более коротким безморозным периодом. Отмеченная тенденция некоторого увеличения количества атмосферных осадков в последние десятилетия в данной части Памира практически не сказывается на процессах почвообразования, так как приrost приходится на

осадки холодного периода, которые преимущественно испаряются при постепенном повышении среднесуточной температуры воздуха.

Выявленные потери почвы могут быть значительно сокращены при нарезке поливных борозд с уклоном менее 1° и одновременном существенном уменьшении поливных норм при разовом поливе, а также более строгом контроле за их соблюдением. Установленная высокая водопроницаемость пахотных почв предполагает использование непродолжительного полива до промачивания верхнего пахотного слоя почвы. Используемый в настоящее время способ полива никак не нормирован, что способствует неоправданным расходам воды и потерям питательных веществ из-за их вертикальной миграции за пределы корневой зоны высеваемых полевых культур и латеральному выносу при формировании поверхностного стока. Повышение продуктивности поливных земель может быть достигнуто благодаря увеличению площадей посева многолетних трав. Их доля может быть увеличена до 50% в днище долины р. Пяндж и до 60–75% в днище долины р. Гунт. Продуктивность многолетних трав существенно больше, чем высеваемых в настоящее время зерновых культур, которые также преимущественно используются на фураж.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаханянц О.Е. Почвы Западного Памира // Почвоведение. 1958. № 1. С. 77–90.
2. Азизов Н.А. Технология орошения хлопчатника на каменистых почвах Таджикистана // Вестник РАСХН. 2010. № 1. С. 63–65.
3. Базаров О.А., Григорьев В.Я., Соловьева О.В. Методика оценки и картографирования противоэрозийной стойкости почв (на примере орошаемых почв Таджикистана) // Почвоведение. 2006. № 11. С. 1374–1385.
4. Базаров О.А., Григорьев В.Я., Соловьева О.В. Полуэмпирическая модель прогноза ирригационной эрозии почв Таджикистана // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1251–1262.
5. Васильев В.А. Стратиграфия четвертичных отложений Таджикистана // Новейший этап геологического развития Таджикистана. Душанбе, 1962. С. 5–34.
6. Владыченский А.С. Особенности горного почвообразования. М.: Наука, 1998. 187 с.
7. Владыченский А.С., Богомолов Е.Г., Абысова О.Н. Строение почвенного покрова высокогорий в горных системах суббореального и бореального поясов // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1519–1526.
8. Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г. Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозийных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 794–801.
9. Голосов В.Н., Маркелов М.В., Беляев В.Р., Жукова О.М. Проблемы определения пространственной неоднородности выпадений <sup>137</sup>Cs для

- оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов // Метеорология и гидрология. 2008. № 4. С. 30–45.
10. *Канн И.А.* Почвы высокогорий Западного Памира // Почвоведение. 1965. № 9. С. 16–25.
  11. *Котова А.Ю., Санжарова Н.И.* Поведение некоторых радионуклидов в различных почвах // Почвоведение. 2002. № 1. С. 108–120.
  12. *Кутеминский В.Я.* Общие закономерности вертикальной зональности и вопросы классификации почв Таджикистана // Докл. почвоведов, агрохимиков и мелиораторов Таджикистана к 7 межд. конгрессу почвоведов. Сталинабад, 1960. С. 3–11.
  13. *Кутеминский В.Я.* О почвах Памира // Изд. отд. с.-х. и биол. наук АН Таджикской ССР. 1960. Вып. 1. № 2. С. 3–14.
  14. *Кутеминский В.Я., Леонтьева Р.С.* Почвы Таджикистана. Душанбе: Ирфон, 1966. 223 с.
  15. *Мамытов А.М.* Почвы гор Средней Азии и Южного Казахстана. Фрунзе: Илим, 1987. 310 с.
  16. *Молчанов Э.Н.* К проблеме почвенно-географического районирования гор Северного Кавказа // Почвоведение. 1991. № 1. С. 5–18.
  17. *Молчанов Э.Н.* Горно-луговые почвы высокогорий Западного Кавказа // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1433–1448.
  18. *Пахомов М.М.* Первые результаты спорово-пыльцевых исследований кайнозойских отложений на Памире // Новейший этап геологического развития Таджикистана. Душанбе, 1962. С. 59–68.
  19. *Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г.* Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 136 с.
  20. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1966. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. IV. 212 с.
  21. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1966. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. II. 229 с.
  22. *Татарадзе Н.Г.* Состав, свойства, агропроизводственная характеристика и пути повышения плодородия орошаемых почв Ванчского района Западного Памира // Тр. Тадж. СХИ. Душанбе, 1983. Т. 41. С. 67–83.
  23. Улучшение гидрометеорологического сервиса в республике Таджикистан. Доклад. Мировой Банк, 2009. 113 с.
  24. *Чедня О.К.* История геологического развития Таджикистана в кайнозой // Новейший этап геологического развития Таджикистана, Душанбе, 1962. С. 283–309.
  25. *Чербарь В.В.* Орошаемые и староорошаемые почвы Западного Памира // Известия АН Тадж. ССР. Отд. биол. наук. Душанбе, 1987. Деп. в ВИНТИ 10.03.87, № 1740-B87. 78 с.
  26. *Чербарь В.В.* Особенности формирования и использования почв в аридных горах Западного Памира // Устойчивое развитие горных территорий. 2010. № 1. С. 19–26.
  27. *Чербарь В.В.* Почвы Западного Памира. Chisinau: Pontos, 2009. 261 с.
  28. *Якутилов М.Р., Ломов С.П., Алиев И.С.* Основные этапы исследования почв Памира // Памир. Душанбе: “Дониш”, 1973. С. 62–90.
  29. *Якутилов М.Р., Таджиев У.Т.* Почвы земледельческой зоны Западного Памира и перспективы их эффективного использования // Сельское хозяйство Таджикистана. 1973. № 4. С. 23–36.
  30. *Bajracharya R., Lal R., Kimble J.M.* Use of radioactive fallout cesium-137 to estimate soil erosion on three farms in west central Ohio // Soil Science. V. 1998. V. 163(2). P. 133–144.
  31. *Basher L.R.* Surface erosion assessment using <sup>137</sup>Cs: Examples from New Zealand // Acta Geologica Hispanica. 2000. V. 35(3–4). P. 219–228.
  32. *Belyaev V.R., Golosov V.N., Kuznetsova J.S., Markelov M.V.* Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of <sup>137</sup>Cs radioactive tracer and conventional techniques // Catena. 2009. V. 79. P. 214–227.
  33. *Belyaev V.R., Markelov M.V., Golosov V.N., Bonte Ph., Ivanova N.N.* The use of cesium-137 to assess modern agrogenic transformation of soil cover in the areas subjected to Chernobyl fallout // Eurasian Soil Science. 2003. V. 36. P. 788–802.
  34. *Golosov V.N.* Application of Chernobyl-derived <sup>137</sup>Cs for assessment of soil redistribution within cultivated field // Soil and Tillage Research. 2003. V. 69(1–2). P. 85–98.
  35. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides / Ed. F. Zapata. Kluwer, 2002. 220 p.
  36. *Hoeck T., Droux R., Breu T., Hurni H., Maselli D.* Rural energy consumption and land degradation in a post-Soviet setting – an example from the west Pamir mountains in Tajikistan // Energy for Sustainable Development. 2007. V. 11(1). P. 48–57.
  37. *Olson K.R., Gennadiyev A.N., Golosov V.N.* Comparison of fly-ash and radio-caesium tracer methods to assess soil erosion and deposition in Illinois Landscapes (USA) // Soil Science. 2008. V. 173(8). P. 575–586.
  38. *Owens P.N., Walling D.E.* Spatial Variability of Caesium-137 Inventories at reference Sites: an Example from two Contrasting Sites in England and Zimbabwe // Appl. Radiat. Isot. 1999. V. 47(7). P. 699–707.
  39. *Pennock D.J., de Jong E.* Spatial pattern of soil redistribution in Boroll landscapes, Southern Saskatchewan, Canada // Soil Sciences. 1990. V. 150. P. 867–873.
  40. *Porto P., Walling D.E., Callegari G.* Using <sup>137</sup>Cs measurements to establish catchment sediment budgets and explore scale effects // Hydrological processes. 2011. V. 25. P. 886–900.
  41. *Sutherland R.A.* Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: a literature survey // Hydrological processes. 1996. V. 10. P. 43–53.
  42. *Walling D.E.* Use of <sup>137</sup>Cs and other fallout radionuclides in soil erosion investigations: progress, problems, and prospects // Use of <sup>137</sup>Cs in the study of soil erosion and sedimentation. Technical Report Series, IAEA Technical Document-1028. 1998. P. 39–62.
  43. *Walling D.E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // J. Environ. Qual. 1999. V. 28. P. 611–622.
  44. *Walling D.E., Quine T.A.* Use of caesium-137 to investigate patterns and rates of soil erosion on arable fields // Soil erosion on agricultural land. London: Wiley, UK, 1990. P. 33–53.