

Н.Е. Рамазанова¹ , А.А. Ахмедова^{1*} , Ж.О. Озгелдинова¹ ,
К.М. Асылбеков¹ , Э.М. Тұрыспекова¹ , Т.А. Базарбаева² 

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Астана

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: anzhelaakhmedova@gmail.com

ОЦЕНКА СМЫВА ПОЧВ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ БАСЕЙНА РЕКИ РУБЕЖКА ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Статья освещает актуальную для настоящего времени проблему водной эрозии почв в бассейнах малых рек Казахстана. Эрозия почвы снижает продуктивность пашен в сельскохозяйственном секторе в результате снижения площадей плодородных территорий. Целью данной работы являлась оценка интенсивности смыва почв в бассейне реки Рубежка для различных видов сельскохозяйственных угодий. Для достижения поставленной цели нами были использованы ГИС, спутниковые данные и усовершенствованное уравнение потерь почв с введением нового показателя Cu, который позволил скорректировать показатели смыва и точнее определить его масштабы на территории исследуемого бассейна. Самый низкий показатель смыва почв от 0 до 0,684 т/га в год в результате исследования был определен для пастбищ на каштановых песчаных и супесчаных почвах южной части бассейна. Данная территория отличается самым низким показателем осадков и более крутым уклоном. Северная часть бассейна реки имеет показатель смыва почв от 1,368 до 2,052 т/га в год. Эти земли в основном используются как пашни на темно-каштановых суглинистых почвах в условиях равнинного рельефа и большей увлажненности климата. В центральной части бассейна наблюдается увеличение доли пастбищ и снижение количества среднегодовых осадков с наивысшими показателями смыва почв – до 3,418 т/га в год, что соответствует «низкому уровню потери».

Ключевые слова: бассейн реки, эрозионные процессы, почва, ГИС, спутниковые данные.

N.Y. Ramazanova¹, A.A. Akhmedova^{1*}, Zh.O. Ozheldinova¹,
K.M. Assylbekov¹, E.M. Turyspekova¹, T.A. Bazarbayeva²

¹Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Kazakhstan, Astana

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: anzhelaakhmedova@gmail.com

Assessment of soil flushing based on an improved universal equation of soil losses using GIS and satellite data on the example of the Rubezhka river basin of the West Kazakhstan region

The article highlights the current problem of water erosion of soils in the basins of small rivers of Kazakhstan. Soil erosion reduces the productivity of arable land in the agricultural sector as a result of a decrease in the area of fertile territories. The purpose of this work was to assess the intensity of soil loss in the Rubezhka river basin for various types of agricultural land. To achieve this goal, we used GIS, satellite data and an improved equation of soil losses with the introduction of a new Cu indicator, which allowed us to adjust the indicators of soil loss and more accurately determine its scale in the territory of the studied basin. The lowest rate of soil loss from 0 to 0,684 t/ha per year as a result of the study was determined for pastures on chestnut sandy and sandy loam soils in the southern part of the basin. This area has the lowest precipitation and steeper slope. The northern part of the river basin has a soil loss rate from 1,368 to 2,052 t/ha per year. These lands are mainly used as arable land on dark chestnut loamy soils in conditions of flat relief and greater humidification of the climate. In the central part of the basin, there is an increase in the share of pastures and a decrease in the amount of average annual precipitation with the highest rates of soil loss – up to 3,418 t/ha per year, which corresponds to a “low level of loss”.

Key words: river basin, erosion processes, soil, GIS, satellite data.

Н.Е. Рамазанова¹, А.А. Ахмедова^{1*}, Ж.О. Озгелдинова¹,
К.М. Асылбеков¹, Э.М. Тұрыспекова¹, Т.А. Базарбаева²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Астана қ.

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: anzhelaakhmedova@gmail.com

Батыс Қазақстан облысы Рубежка өзенінің алабы мысалында ГАЖ және спутниктік деректерді қолдана отырып, топырақ шығындарының жетілдірілген әмбебап теңдеуі негізінде топырақ шайылуын бағалау

Мақала Қазақстанның кіші өзендерінің алаптарында топырақтың су эрозиясының қазіргі кездегі өзекті мәселесін баяндайды. Топырақ эрозиясы құнарлы аумақтардың азаюы нәтижесінде ауыл шаруашылығы секторындағы егістік өнімділігін төмендетеді. Бұл жұмыстың мақсаты әртүрлі ауылшаруашылық жерлері үшін Рубежка өзенінің алабында топырақ шайылуын қарқындылығын бағалау болды. Осы мақсатқа жету үшін біз ГАЖ, спутниктік деректер және жаңа Си индикаторын енгізе отырып, топырақтың шайылуының жетілдірілген теңдеуін қолдандық, бұл шайылуының көрсеткіштерін түзетуге және зерттелетін алаб аумағында оның масштабын дәлірек анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижесінде жылына 0-ден 0,684 т/га-ға дейінгі топырақ шайылуының ең төменгі көрсеткіші алабының оңтүстік бөлігіндегі каштан құмды және құмды сазды топырақтардағы жайылымдар үшін анықталды. Бұл аймақ жауын-шашынның ең төменгі деңгейімен және тік көлбеуімен сипатталады. Өзен алабының солтүстік бөлігінде жылына 1,368 ден 2,052 т/га-ға дейінгі топырақ шайылуының көрсеткіші бар. Бұл жерлер негізінен жазық жер бедерде және климаттың ылғалдылығында қара каштан сазды топырақтарда егістік ретінде пайдаланылады. Рубежка өзен алабының орталық бөлігінде жайылымдар үлесінің ұлғаюы және орташа жылдық жауын-шашын мөлшерінің азаюы байқалады, топырақты шайылуының ең жоғары көрсеткіштері – жылына 3,418 т/га дейін, бұл “шығынның төмен деңгейіне” сәйкес келеді.

Түйін сөздер: өзен алабы, эрозиялық процестер, топырақ, ГАЖ, спутниктік деректер.

Введение

Водная эрозия почв – это отрыв частиц почвы под влиянием тех или иных сил и их перенос во взвешенном состоянии водой с высоких элементов рельефа (смыв, размыв) в пониженные участки (намыв) в процессе стока дождевых, поливных, талых вод. В Западном Казахстане на возникновение и дальнейшее развитие водной эрозии влияют как природные, так и хозяйственные факторы. К природным факторам относятся климат, растительность, рельеф, геологическое строение и почвенный покров. Степень и характер освоенности территории, интенсивность ее использования, влияние использования территории на свойства почв относятся к хозяйственным факторам водной эрозии.

Скорость эрозионных процессов зависит от расчлененности территории, длины и крутизны склонов, температуры воздуха, количества и характера осадков, интенсивности снеготаяния, наличия растительности и водно-физико-химических свойств почв. При одинаковой крутизне склонов почвы смываются сильнее на склонах большей протяженности. На прямых склонах меньший смыв почв обнаруживается в приводораздельной части, а наибольший на участках, примыкающих к гидрографической сети. Такая

же закономерность распределения смыва наблюдается и на выпуклых склонах.

Водная эрозия почв является одним из опасных явлений, угрожающих их плодородию, а в дальнейшем снижению продуктивности сельскохозяйственных культур. Проблема водной эрозии почв в последние десятилетия все больше обостряется, в связи с интенсивным ростом населения и, соответственно, темпами развития и освоения сельскохозяйственных угодий. В частности, в северных и северо-западных регионах нашей страны в связи с возросшим за последние пятьдесят лет уровнем освоения залежных земель, ухудшилась ситуация не только в связи со снижением плодородия, но и с понижением качества поверхностных вод.

Возникновение и развитие научной мысли об эрозионных процессах и противоэрозионной защите имеет многовековую историю. В нашей стране при изучении эрозии почв опираются на труды таких ученых, как Ц.Е. Мирцхулава, М.Н. Заславского, М.С. Кузнецова, А.Н. Каштанова и др. Эмпирическое направление в эрозиоведении, в основе которого лежит выяснение количественных закономерностей влияния, так называемых «факторов эрозии» (климата, рельефа, почвы, растительности и хозяйственной деятельности человека) на интенсивность водной и

ветровой эрозии почв представлено трудами таких ученых, как Wischmeier, W.H., Smith, D.D., Woodruff, N.P., Siddoway, F.H. и др.

В Республике Казахстан вопросами водной эрозии в разные годы занимались Бабаев К.Б. (1970), Тегисов Т.А. (1975), Иорганский А.И. и Балгабеков К.Б. (1979). Их работы были ориентированы на условиях предгорной зоны. Несмотря на имеющиеся исследования по водной эрозии и дальнейшие рекомендации по проведению противоэрозионных мероприятий, стоит отметить, что проводились они не в полной мере.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования стал бассейн р. Рубежка в Западно-Казахстанской области Казахстана (Рисунок 1). Река Рубежка берет свои истоки в селе Рубежинское с отрогов Общего Сырта и протекает по северной части Западно-Казахстанской области. Бассейн реки расположен в пределах района Байтерек (до 2019 года Зеленовский) Западно-Казахстанской области. Площадь бассейна составляет 430 км², длина реки 38 км. Река протекает по степной зоне Западно-Казахстанской области, является правым притоком реки Жайык. Направление течения реки с севера на юг. Весной Рубежка полноводна, при условии активного таяния снега, воды реки устремляется к местам естественного орографического понижения Общего Сырта. Талые воды, попадая в русло реки, повышают ее уровень в период весеннего снеготаяния. Летом река пересыхает на нескольких участках. Река Рубежка, как и все реки Общего Сырта, питается талыми и дождевыми водами.

Материалами для исследования послужили данные изучения водно-эрозионных процессов Западно-Казахстанской области, которое проводилось в течение длительного времени, включая выездные полевые экспедиции и наблюдения. Основой для расчета потерь почвы в бассейнах рек региона является универсальное уравнение потери почв RUSLE. Впервые данное уравнение было предложено американскими учеными Wischmeier W.H. и Smith D.D., позднее было доработано Renard K. и Foster G. Универсальное уравнение потерь почвы (RUSLE) подсчитывает среднегодовую скорость эрозии, основанную на характере рельефе, осадков, типе почвы, системе сельскохозяйственных культур и методах управления. RUSLE прогнозирует исключительно величину потерь почвы в результате дождевой эрозии и не учитывает дополнительные потери

почвы, которые могут возникнуть в результате овражной, ветровой или пахотной эрозии. Данная модель подсчета потерь почвы применяется в отдельных системах земледелия и управления, но также применима к несельскохозяйственным условиям, таким как строительство. Преимуществом данной модели является учет конкретной местности с его типом почв, выращиваемой культурой и системой управления. RUSLE изначально было разработано на основе исследований эрозии почвы с 30-х годов, собранных службой охраны почв Министерства сельского хозяйства США, но за долгий срок с момента внедрения уравнение отлично зарекомендовало себя не только для решения задач природоохранного характера в США, но стало популярным во всем мире.

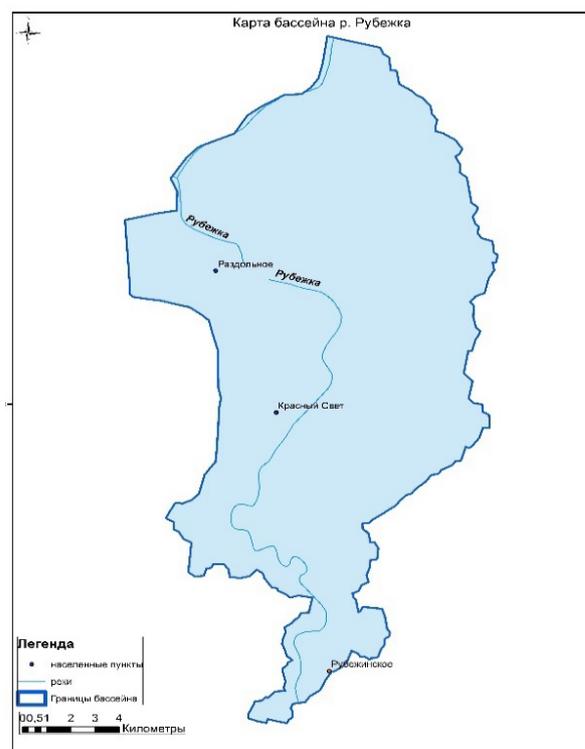


Рисунок 1 – Карта бассейна р. Рубежка

Борьба с эрозией в Казахстане на раннем этапе изучения была сосредоточена преимущественно на ветровом типе, в то время как водная эрозия во время таяния снега наносила не меньший урон, но изучалась недостаточно. Позже, на практике, данный подход показал свои недостатки. Было доказано, что в смытых почвах урожайность сельскохозяйственных культур снижается до 80%. Ученые России и США опре-

делили, что в процессе водной эрозии в период снеготаяния смыв почвы достигает до 15 т/га за несколько дней. В Казахстане водная эрозия изучалась с разработкой противоэрозионных мер лишь в предгорных и горных районах.

В Западном экономическом регионе, как и по всей стране, в настоящее время уделяется пристальное внимание и меры по управлению тальными водами и сокращению интенсивности водной эрозии. Эффективная реализация проектов по переводу землепользования на ландшафтно-экологические основы невозможна без учета внимания данного вопроса, соответственно, добиться более эффективного и устойчивого перевода сельскохозяйственного землепользования на экологически безопасную основу, сократить и предупредить деградацию и опустынивание земель будет практически невыполнимо.

Г.П. Сурмач (1979), В.Д. Иванов (1985), М.С. Кузнецов (2002) и др. отмечают, что водная эрозия почв является следствием сложного взаимодействия природных факторов (климата, рельефа, почвы, растительности) и хозяйственной деятельности человека.

Принимая во внимание основные факторы эрозии, вызываемой стоком талых вод, следует отметить, что смыв почвы при снеготаянии связан, прежде всего, с формированием снежного покрова (Г.П. Сурмач, 1967, 1971, В.М. Васильева, Э.С. Херсонский, 1977, А.В. Павлов, 1979 и др.), глубиной промерзания, увлажнением почвы, скоростью ее таяния, эродирующей способностью талых водных потоков, рельефа, агрофона, противоэрозионной стойкости почв и др. Среди этих факторов управляемым является агрофон. Согласно М.С. Кузнецову и В.В. Демидову (2002), увеличению высоты снежного покрова и запасов воды в нем по сравнению с отвальной вспашкой способствуют применение на склонах плоскорезной обработки почвы с сохранением стерни на поверхности почвы (соответственно на 3,5-4,5 см и 7-10,8 мм), посевы озимых зерновых культур (11-13 см и 10,8-18,5 мм) и многолетних трав 1-го и 2-го года пользования (7-8,5 см и 22,6-28,8 мм). Также М.С. Кузнецовым, Г.П. Глазуновым, и др. (1996) установлено, что для северных районов этот показатель выше, чем для южных: в российском Подмоскowie он составляет 0,065 мм/мин, в то время как на Кубани его величина всего лишь 0,015 мм/мин.

По мнению многих авторов наиболее применимыми в настоящее время являются реальные, с позиции экологии и практики, рекомендации

по нормам смыва, разработанные Г.П. Сурмачем (1992): 0,5-2,0 т/га в год (0,05-0,2 мм/год при плотности сложения почвы 1 т/м³) в зависимости от типа почвы, степени ее смывости и плотности материнской породы.

В работе отражен ход и алгоритм определения нового фактора «Кривизна – Си» в бассейне реки Рубежка для расчета коэффициента уклона LSCu с применением усовершенствованного уравнения. Именно это является новизной, практическая значимость заключается в применении данного алгоритма в вопросах эрозионных процессов в Министерстве сельского хозяйства Республики Казахстан, местного управления, крестьянских хозяйствах, учреждениями и организациями, заинтересованных в получении качественной разноплановой информации, отражающей современное состояние почвенного покрова сельскохозяйственных угодий.

В качестве материалов для исследования были использованы:

- космоснимки цифровой модели рельефа SRTM для дальнейшего определения бассейна реки посредством обработки данных ГИС;
- статистические данные количества осадков по метеостанциям Западно-Казахстанской области для проведения в дальнейшем интерполяции и создания карты осадков в бассейне реки Рубежка;
- почвенные карты для сравнения и анализа почвы территории бассейна;
- данные, полученные в результате экспедиционных исследований;
- топографические данные по склону и рельефу изучаемой местности.

Для создания территории бассейна реки Рубежка в программе ArcGIS был проведен расширенный морфометрический анализ космоснимков цифровых моделей рельефа с высотными отметками, а также использованы методы геоинформационного картографирования бассейновых территорий, состоящие из нескольких этапов, включающих первичную обработку данных, анализ картографических материалов и космоснимков, формирование единой базы географических данных. В процессе работы был также задействован метод сравнительного анализа данных, модели пространственных данных, ретроспективный анализ, системно-структурный и типологический подходы.

Для расчета потерь почвы исследуемого региона на основе уравнения RUSLE были выделены пять основных факторов. Каждый фактор

представляет собой численную оценку конкретного состояния, которое влияет на степень эрозии почвы в конкретном месте. Значения эрозии, отраженные этими факторами, могут значительно варьироваться из-за различных погодных условий. Таким образом, значения, полученные из RUSLE, более точно представляют долгосрочные средние значения.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P, \quad (1)$$

где

R – фактор количества осадков

K- коэффициент размываемости почвы

LS – фактор: L- коэффициент длины, S- коэффициент уклона

C – коэффициент землепользования

P – фактор противоэрозионных мероприятий.

Исходными данными для составления карты осадков региона исследования являются статистические ряды осадков за теплый и холодный периоды 2010–2021 гг. по данным РПП Казгидромет. Были взяты показатели осадков по каждому сроку наблюдения за месяц для каждой метеостанции региона исследования, после чего проводилось осреднение и обработка данных в программе Microsoft Office Excel. В процессе картографирования осадков мы использовали различные методы интерполяции для отображения осадков. Один из основных вариантов интерполяции выполнен в модуле Spatial Analyst ПО ArcGIS 10.4 – «Сплайн», кроме этого, была применена альтернативная формула для вычисления фактора $R = 0,548257 \times P^{-59,9}$; где P — это среднегодовое количество осадков.

Данные для ГИС моделирования по K-фактору были взяты из почвенной карты 1976 года и Национального Атласа РК 2010 года. В 2021 году в ходе полевой экспедиции на ключевых участках исследования проводилось определение механического состава почвы. Расчет фактора эродированности почвы (K) проводился с помощью программы ArcGIS 10.4 на основе полученных экспедиционных данных.

Определение фактора длины и уклона (LS) проводилось на основе космических снимков ЦМР, уравнения Стоуна и Хилборна, инструментов программы ArcGIS 10.4 «Гидрология».

Для составления карт фактора природоохранной поддержки и фактора управления урожаем использовался метод полевых эмпирических

исследований, а также сравнительно-географический метод, заключающийся в сопоставлении и анализе данных карт землепользования, почвенно-земельного покрова исследуемой территории и космических снимков.

Для определения фактора C за основу был взят полевой метод и методы ДЗЗ. В результате чего с помощью разработанной шкалы Wischmeier W.H., Smith D.D. вычитывается один обобщенный коэффициент. Фактор C можно определить, выбрав тип культуры и способ обработки почвы, которые соответствуют полю, а затем умножив эти коэффициенты вместе.

Также использован метод оценки смыва почвы, который предназначен для выявления и принятия мер по возникновению рисков, а также для своевременного и эффективного реагирования на любые отклонения.

Усовершенствование универсального уравнения потерь почвы заключается во введении нового фактора «Кривизна» C_u , это вторая производная поверхности (то есть уклон уклона). Преобразованная формула имеет вид:

$$A = R \times K \times LSC_u \times C \times P, \quad (2)$$

где C_u – кривизна склона (безразмерный).

Топографический фактор представляет собой отношение потерь почвы при заданных условиях к потерям на участке со «стандартной» крутизной откоса 9% и длиной откоса 22,6 м. Топографический фактор состоит из двух факторов: длины склона (L), крутизны склона (S) и кривизна склона (C_u).

Степень эрозии увеличивается с увеличением длины откоса. При определении LSC_u-фактора использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР). Коэффициент LS был получен из уравнения Стоуна и Хилборна. Расчеты и коэффициенты пространственного распределения L, S и C_u проводились в среде ГИС с использованием следующего уравнения:

$$LSC_u = \left[\frac{QaM}{22.13} \right] y (0.065 + 0.045 \times S_g + 0.0065 \times S_g^2) \quad (3)$$

где LSC_u = Топографический фактор; Qa = Flow Accumulation grid; S_g = наклон Grid в процентах; M = размер grid (x × y), y или NN common значение = безразмерная экспонента, принимающая значение уклона и кривизны в пределах 0,2–0,5.

Таблица 1 – NN значения S, Cu

Curvature	NN	Slope	NN
<0,5	0,2	<1	0,2
>0,5 – <2,5	0,3	$1 \leq s < 3$	0,3
>2,5 – <4,5	0,4	$3 \leq s < 5$	0,4
>4,5	0,5	>5	0,5

$$\text{NN common} = \text{NN Slope} + \text{NN Curvature}/2 \quad (4)$$

Новый фактор – Кривизна (профильная), это вторая производная поверхности (то есть уклон уклона). По предложению Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. общая кривизна на основе алгоритма Zevenbergen-Thorne может быть рассчитана как:

$$\text{Curvature} = -2(D + E) \times 100, \text{ где} \quad (5)$$

$$D = \frac{[(z_4 + z_6) - z_5]}{l^2} \quad (6)$$

$$E = \frac{[(z_2 + z_8) - z_5]}{l^2} \quad (7)$$

где $z_4 \dots$ – высотные точки в ячейках; l – расстояние между элементами матрицы высот (пространственное разрешение растра), единицы измерения – метры.

Кривизна измеряется в $1/m$, после чего умножаются на 100, т.е. профильная (вертикальная) кривизна характеризует изменение уклона поверхности на 100 м вдоль его основного направления. Выпуклая часть характеризуется положительными значениями, а вогнутая – отрицательными, нулевые значения соответственно характеризуются плоской в профиле поверхностью.

Диапазон возможных значений для всех трех показателей кривизны колеблется от -0.5 до +0.5 для территорий с равнинным рельефом и от -4 до +4 для горных районов. Отметки высот региона исследования колеблется до 277 м NN кривизны рассчитывается + 0,5.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследовательских работ был определен бассейн реки Рубежка на топографической карте Западно-Казахстанской области в масштабе 1:500000 с использованием программного обеспечения ArcGIS 10.4. Выделенная карта позже использовалась для извлечения области исследования из цифровой модели

рельефа, полученной с помощью картографического спутника SRTM.

Для вычисления границ бассейна реки выполнен алгоритм действий. Во-первых, использован инструмент Заполнение (Fill), здесь происходит процесс сглаживания снимка. Следующим действием является создание карты Направление стоков (Flow Direction). Подготовленный растр содержит в каждом пикселе информацию в целочисленном виде (1,4,8,16,32,64,128) о направлении стоков по сторонам света. Затем, используется инструмент суммарный сток (Flow Accumulation) для идентификации русел рек. В итоге снимок будет иметь черный цвет, на котором будут видны реки белого цвета. Однако для более отчетливого представления рек используется растяжка снимка. После этого, указывается опорная точка, от которой ArcGIS будет использовать функцию «Вырисовывать» для бассейна реки. Для этого используем инструмент Рисование (Drawing). В конечном итоге для выделения границ бассейна реки используется водосборная область (Watershed).

С помощью статистических данных РГП Казгидромет, используя методы интерполяции и альтернативную формулу вычисления, нами были получены значения осадков для исследуемого участка, на основе которых строилась карта среднегодового количества осадков (Рисунок 2-3).

Результатом стало следующее распределение показателей фактора R на территории бассейна реки Рубежка:

- 111 – 8%;
- 111-112 – 22%;
- 112 – 28%;
- 112-113 – 42%;

Коэффициент эродированности почвы (K) представляет восприимчивость почвы или поверхностного материала к эрозии, транспортабельность наносов, а также количество и скорость стока с учетом конкретного количества осадков, измеренных при стандартных условиях. Стандартным условием является единичный участок длиной 22,6 м с уклоном 9%, поддерживаемый под паром, обрабатываемый вверх и вниз по склону холма (Kim, 2006).

Карта механического состава почв исследуемой местности была составлена на основе отсканированных почвенных карт территории бассейна реки Рубежка (Рисунок 4).

Анализируя карту механического состава почв бассейна реки Рубежка, сделан вывод, что более 73% территории занимают тяжелые суглинки, средние суглинки составляют 14%, пески – более 8%, супеси – более 5%.

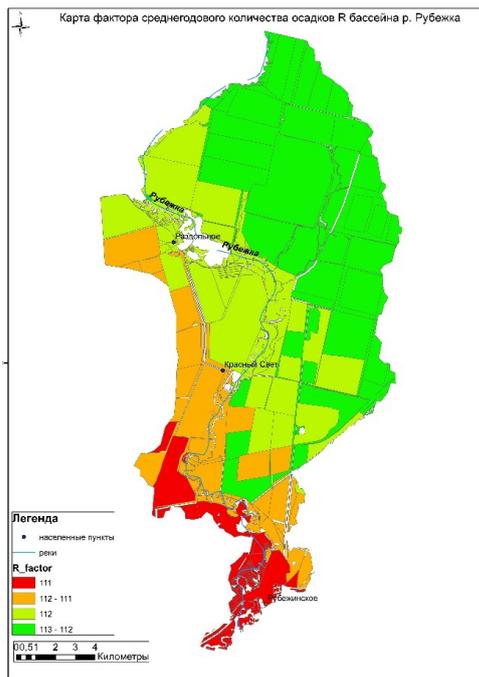


Рисунок 2 – Карта среднегодового количества осадков

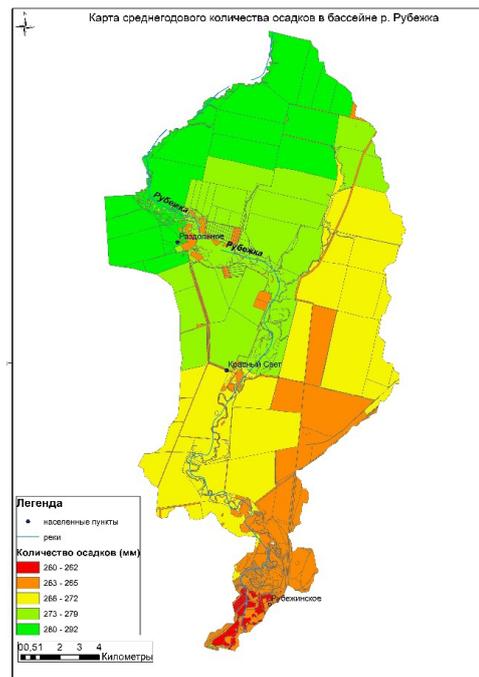


Рисунок 3 – Карта фактора среднегодового количества осадков (R)

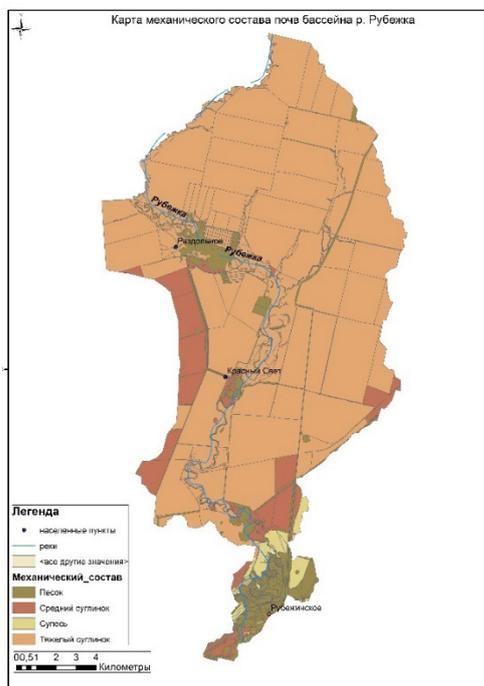


Рисунок 4 – Карта механического состава почв

Анализ механического состава почв в полевых условиях по ключевым точкам, проводимый в 2021 году, показал, что они коррелируют с имеющимися картографическими данными. На базе

полученных векторов механического состава почвы изучаемой области по формуле RUSLE были определены значения текстурных классов почв Западно-Казахстанской области (Рисунок 5). На основе полученных данных, нами была составлена карта коэффициента размываемости почвы (K) для исследуемого бассейна (Рисунок 6).

Фактор C учитывает тип культуры и метод обработки почвы. Он используется для определения относительной эффективности систем управления почвой и растениеводством с точки зрения предотвращения потери почвы. В качестве исходных данных картографирования типа культуры ЗКО применялись космические снимки Sentinel-2 (10 м) за 2021 год, снимки подбирались летнего сезона, с максимально низкой облачностью, а также использовались материалы полевых исследований с GPS-привязкой, интегрированных в единой картографической проекции и системе координат, материалы полевых геоботанических описаний на ключевых участках.

С фактор используется, чтобы показать влияние возделывания сельскохозяйственных культур и методов управления на скорость эрозии почвы на сельскохозяйственных землях. Карта фактора C (Рисунок 8) была подготовлена на основе карты сельскохозяйственных угодий исследуемой территории (Рисунок 7).

Текстурный класс	К-фактор тонн/га (тонн/акр)		
	Средний COB*	Менее 2% COB	Более 2% COB
Глина	0.49 (0.22)	0.54 (0.24)	0.47 (0.21)
Суглинок	0.67 (0.30)	0.74 (0.33)	0.63 (0.28)
Тяжелая глина	0.38 (0.17)	0.43 (0.19)	0.34 (0.15)
Супесчаный суглинок	0.29 (0.13)	0.31 (0.14)	0.27 (0.12)
Мелкая супесь	0.40 (0.18)	0.49 (0.22)	0.38 (0.17)
Суглинистый мелкий песок	0.25 (0.11)	0.34 (0.15)	0.20 (0.09)
Крупнозернистая супесь	0.16 (0.07)	–	0.16 (0.07)
Мелкая супесь	0.40 (0.18)	0.49 (0.22)	0.38 (0.17)
Песок	0.04 (0.02)	0.07 (0.03)	0.02 (0.01)

Рисунок 5 – Текстурные классы почв и их значения для формулы RUSLE

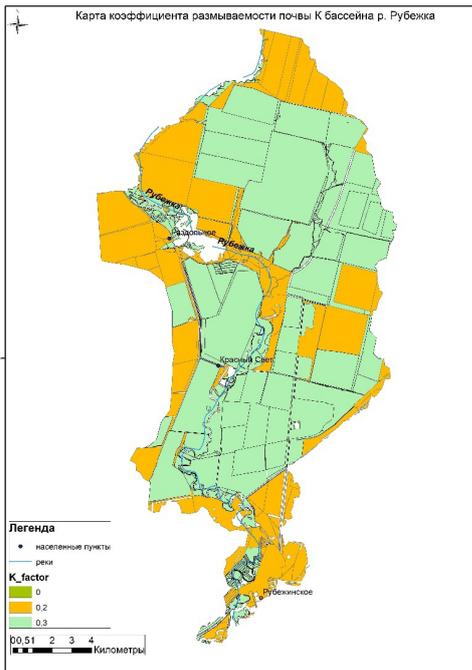


Рисунок 6 – Карта коэффициента размываемости почвы (K)

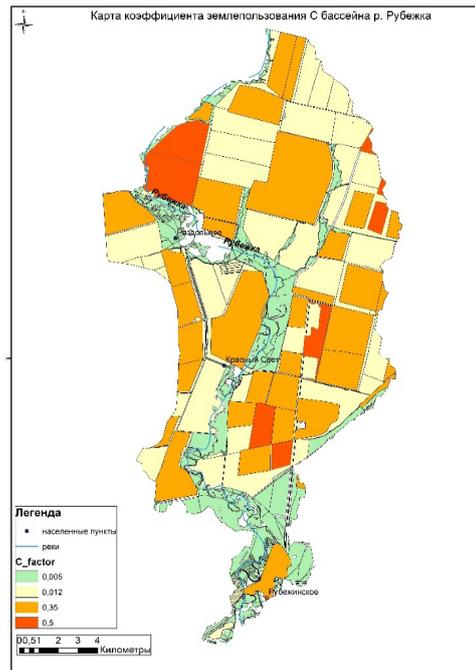


Рисунок 7 – Карта сельскохозяйственных землепользования (C)

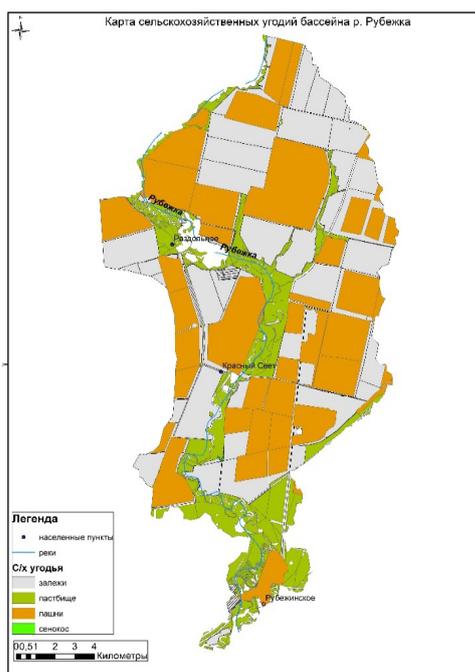


Рисунок 8 – Карта коэффициента угодий

Для определения фактора С был выбран метод типа посева и обработки почвы (таблица 2 и таблица 3 по Wischmeier and Smith, 1978). Чтобы вычислить коэффициент землепользования, были выбраны значения из таблицы 2, после умножены их значения на данные из таблицы 3, в результате были определены числовые данные фактора С.

Таблица 2 – Фактор видов сельскохозяйственных культур (Wischmeier and Smith, 1978)

Виды сельскохозяйственных культур	Фактор
Зерновые культуры	0.40
Сулос кукурузы, бобы и капуста	0.50
Крупы (весенние и зимние)	0.35
Садовые культуры	0.50
Фруктовые деревья	0.10
Сенокос и пастбища	0.02

Например, для пастбища коэффициент С будет $0,25 \times 0,02 = 0,005$.

В результате анализа полученных данных для бассейна реки Рубежка определено следующее соотношение фактора С:

- 0,005 – 22%;

- 0,012 – 33%;

- 0,35 – 37%;

- 0,5 – 8%.

Таблица 3 – Фактор и методы обработки почв (Wischmeier and Smith, 1978)

Метод обработки почвы	Фактор
Осеннее плугование	1.0
Весеннее плугование	0.90
Мульчирование	0.60
Хвостовая обработка почвы	0.35
Зональная обработка почвы	0.25
Нет почвообработки	0.25

Фактор противоэрозионных мероприятий (Р) представляет собой отношение потери почвы при использовании вспомогательной техники к потере почвы при выращивании в прямом ряду вверх и вниз по склону и используется для учета положительного воздействия этих вспомогательных методов. Фактор Р учитывает методы контроля, которые снижают эрозионный потенциал стока за счет их влияния на структуру дренажа, концентрацию стока, скорость стока и гидравлические силы, оказываемые стоком на почву. Значение коэффициента Р варьируется от 0 до 1, значение, приближающееся к 0, указывает на хорошую практику сохранения, а значение, приближающееся к 1, указывает на плохую практику сохранения. Для вычисления фактора Р воспользовались данными Wischmeier and Smith, 1978 (таблица 4).

Таблица 4 – Данные Р фактора (Wischmeier and Smith, 1978)

Практика поддержки	Р- фактор
Вверх и вниз по склону	1,0
Поперечный уклон	0,75
Контурное земледелие	0,50
Обрезка полос, поперечный уклон	0,37
Обрезка полосы, контур	0,25

Основываясь на карте сельскохозяйственных угодий, полученной нами ранее, определили следующие значения фактора Р для бассейна реки Рубежка:

- значение для пастбищ и сенокосов – 0,1;

- значение для залежей – 0,25;

- значение для пашен – 0,75.

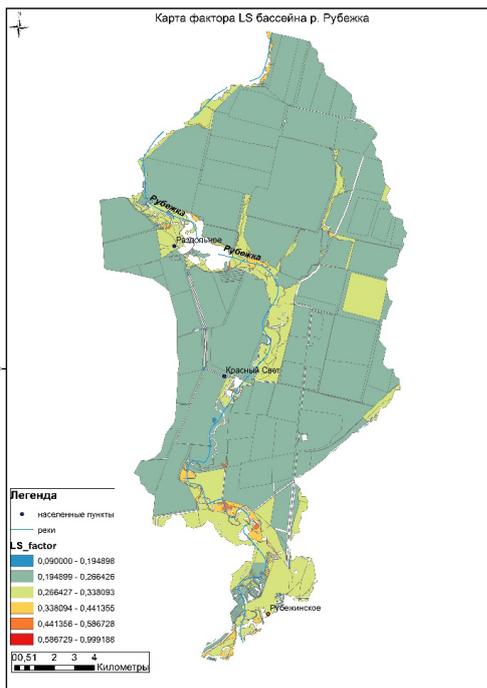


Рисунок 9 – Карта фактора противоэрозионных мероприятий (P)

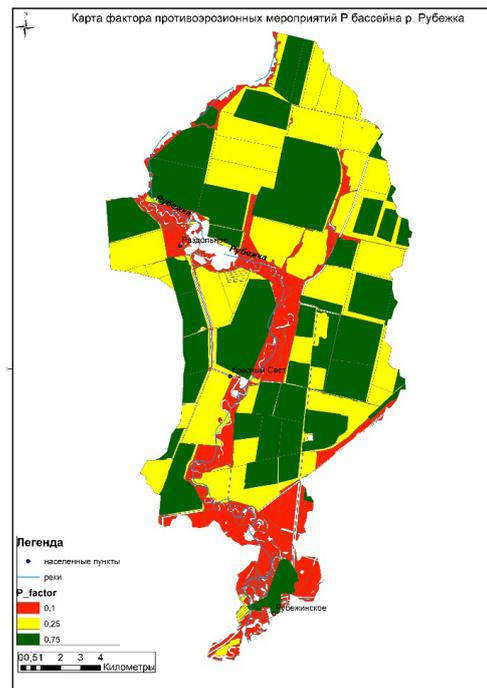


Рисунок 10 – Карта фактора LS

После занесения вычисленных данных в атрибутивную таблицу, была получена карта фактора противоэрозионных мероприятий исследуемого бассейна (Рис. 9).

В ходе работ рассчитана и составлена карта топографического фактора. Топографический фактор состоит из двух факторов: длины склона (L), крутизны склона (S). Коэффициент LS был получен из уравнения Стоуна и Хилборна. Расчеты и определение коэффициентов пространственного распределения L, S проводился в среде ГИС, используя уравнение:

$$LS = \text{power}[(\text{Flow Accumulation}) \times \text{cell size}/22.13]^{0,4} \times \text{power}[\sin(\text{slope}) \times 0,01745/0,0896] \quad (8)$$

На основе космических снимков ЦМР, уравнения Стоуна и Хилборна, инструментов ГИС программы ArcGIS 10.4 «Гидрология» нами была составлена карта фактора LS (Рис. 10).

Вычислив коэффициенты всех факторов, с помощью универсального уравнения смыва почв определили фактор А и получили карты смыва почв для сельскохозяйственных угодий территории бассейна реки Рубежка, а также, ис-

пользуя усовершенствованное уравнение потери почвы, определили величину смыва с учетом коэффициента кривизны C_u (Рис. 11-12).

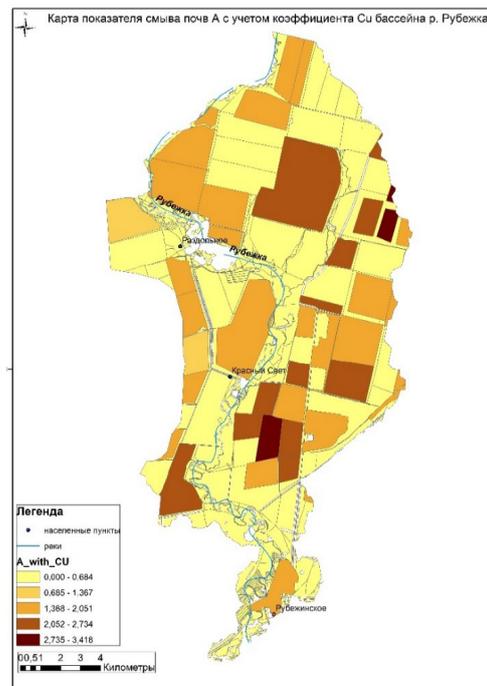


Рисунок 11 – Карта показателя смыва почв (A)

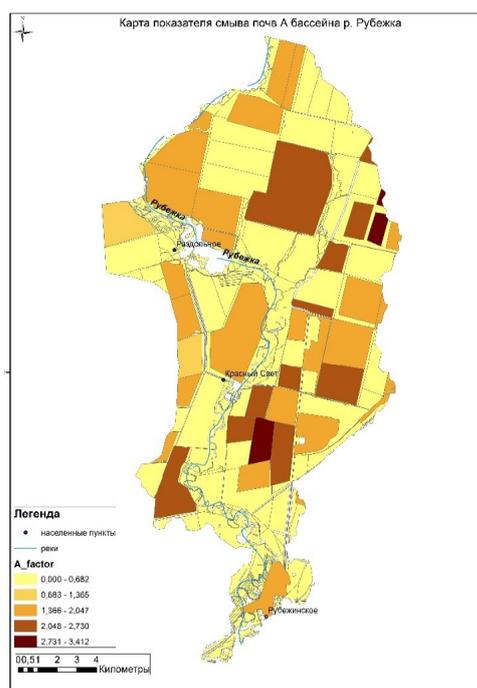


Рисунок 12 – Карта показателя смыва почв А с учетом коэффициента C_u

Заключение

Анализируя полученные результаты по формуле RUSLE и усовершенствованной формуле, можно сделать вывод, что на эрозию влияет введенный фактор кривизны уклона (C_u), наряду с другими факторами. В своих расчетах мы используем именно профильную кривизну,

которая влияет на ускорение или замедление потока, и, следовательно, влияет на эрозию и депонирование осадков, которая вычисляется с помощью ПО ArcGIS (модуль Spatial Analyst). Максимальное значение итогового фактора по исходной формуле RUSLE достигает 3,412 т/га в год, а по усовершенствованной формуле (с фактором кривизны) достигает 3,418, разница итоговых значений составляет 0,006. Учитывая амплитуду абсолютных высот в бассейне реки Рубежка от 30 до 93 метров, различия в факторе А были не столь велики. Минимальные значения также имеют небольшую разницу, которая равна 0,002.

В обоих случаях максимальное значение итоговой оценки RUSLE характерно для пахотных земель и, наоборот, минимальное значение для пастбищ, залежей и сенокосов. Если рассматривать пространственную разницу между полученными результатами, то увеличение характерно для пашен предпойменных в среднем течении реки Рубежка. Таким образом, из полученных результатов можно сделать вывод, что кривизна наклона влияет на ускорение или замедление потока и, следовательно, влияет на эрозию.

Данное исследование было профинансировано по проекту грантового финансирования научных исследований по договору № 171/36-21-23 от «13» апреля 2021 г., по теме: AP09260232 «Усовершенствование универсального уравнения потерь почвы (RUSLE) для оценки смыва почвы сельскохозяйственных угодий Казахстана с применением ГИС-технологий и спутниковых данных» на 2021-2023 год.

Литература

- Kim H.S. Soil Erosion Modeling Using RUSLE and GIS on the IMHA Watershed, South Korea. Doctoral dissertation. Colorado State University, USA – 2016.
- Маханова Н.Б., Берденов Ж.Г., Абильдинов К.К., Е.Х. Мендыбаев. Оценка эрозии почв по модели «RUSLE» бассейна реки Жыланды// Вестник КазНУ. Серия Географическая. – 2020 – Том 59, № 4, 56–69 с.
- Васильченко, Н. И. Проявление водной эрозии в почвах Северного Казахстана// Материалы Международной научно-практической конференции «Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия». Минск – 2013. – С. 90–93.
- Wischmeier W. H. Predicting rainfall erosion losses / W. H. Wischmeier, D. D. Smith // US Dept, of Agric. Handbook. – 2002. – № 537. – 65 p.
- Wischmeier W.H., Smith, D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook № 282. USDA-ARS, USA – 1998. – 242 p.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook – 2016. – No 537, U.S. Department of Agriculture. – 47 p.
- Ramazanov N. Modeling soil erosion in the Chagan river of the west Kazakhstan with using RUSLE and GIS tools / N. Ramazanov., T. Darbayeva., B. Chashina., Zh. Berdenov., E. Mendybayev., Wendt. J.A. & Atasoy E // Journal of Environmental Biology (JEB). – Vikas Nagar. INDIA – 2020. – P. 396-404.
- Ian D. Moore and John P. Wilson. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Equation: Simplified method of estimation // Journal of Soil and Water Conservation – 1992. – 58 p.

P.J.J. Desmet and G. Govers. A GIS procedure for automatically calculating the USLE factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation* September – 1996. –

Renard KG, Foster G, Weesies GA, Mccool DK, Yoder DC. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook* – 2017. – No 703. United States Department of Agriculture, Washington

Schultz, R.C., J.P. Colletti, T.M. Isenhardt, C.O. Marquez, W.W. Simpkins and C.J. Ball. Riparian forest buffer practices. Chapter 7 pp 189-282; in: Garrett, H.E., W.J. Rietveld and R.F. Fisher (eds.) *North American Agroforestry: An integrated science and practices*. American Society of Agronomy, Madison, WI. – 2000. – 402 pp.

Turekhanov A. Bases of effective use of natural pastures. *Science* – 2016. – 18 p.

Van Remortel, R.D., Maichle, R.W., Hickey, R.J. Computing the LS Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through ArrayBased Slope Processing of Digital Elevation Data Using a C++ Executable. *Computers & Geosciences* 30 – 2004. – P. 1043–1053.

Willett, C.D., R.N. Lerch, R.C. Schultz, S.A. Berges, R.D. Peacher, and T.M. Isenhardt. Streambank Erosion in Two Watersheds of the Central Claypan Region of Missouri, USA. *Journal of Soil and Water Conservation*. doi:10.2489/jswc.67.4.249 – 2012.

Акиянова Ф.Ж., Васильченко Н.И. Процессы эрозии и дефляции почв Акмолинской области в условиях агломерационного развития региона // *Материалы международной конференции «Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития»*. Улан-Уде – 2015. – С. 372–376.

Воронин А.Д., Кузнецов М.С. Опыт оценки противозерозионной стойкости почв // *Эрозия почв и русловые процессы*. – 1978. – Вып. 1. – М. – С. 99-115.

Гаврилица А.О. Эрозионные процессы при поливе дождеванием и пути их минимизации // *Почвоведение*. – 1993. – № 1. – С. 77-84.

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. – 2007. – М.: Физматлит, – 240 с.

Добровольский Г.В., под ред. Добровольского Г.В. Деградация и охрана почв: монография. – 2002 – М.: Изд-во МГУ – 654 с.

Заславский М.Н. Эрозиоведение : учебник для геогр. и почв. спец, вузов. – 1983. – М.: Высшая школа, – 320 с.

Заславский М. Н. Эрозия почв. – 1979. – М.: Мысль, – 245 с.

Кузнецов М.С., Глазунов Г.П., Зорина Е.Ф. Физические основы эрозии почв. Моек. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. – 1992. – М. : Изд-во МГУ, – 95 с.

Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв : основные закономерности и количественные оценки. – 1993. – М.: Изд-во МГУ, – 200 с.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. – 1955 – АН СССР, Ин-т геогр. – М.: АН СССР, – 348 с.

Мирицхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. – 1967. – М.: Колос, – 179 с.

Мирицхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. – 1970. – М.: Колос, – 239 с.

Мирицхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. – 1988 – Л.: Гидрометеиздат, – 303 с.

Токсанбаева С.Т., Рамазанова Н.Е., Тусупбеков Ж.А. Оценка эрозии почв по модели «Rusle» бассейна реки Нура. // *Вестник КазНУ. Серия Географическая*. – 2021 – Том 61, № 2, 108–119 с.

Дурасов А.М., Тазабеков Т.Т. Почвы Казахстана// *Коллективная монография*. – Алма-Ата, Кайнар, 1981 г. – 152 с.

Panagos, P., Ballabio, C., ...Beguería, S., and Alewell, C.//*Rainfall erosivity in Europe, Science of the Total Environment*, 511, 801–814, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>, 2015a

Байшолоанов С.С.//*Агроклиматические ресурсы Западно-Казахстанской области: научно-прикладной справочник / Астана, 2017. – 128 с.*

Лопырев М.И., Рябов Е.И. //*Защита земель от эрозии и охрана природы: Учебное пособие*. – М.: Агропромиздат, 1989. – 240 с.

References

Kim, H.S. Soil Erosion Modeling Using RUSLE and GIS on the IMHA Watershed. South Korea: Colorado State University, USA, Doctoral dissertation, 2016.

Mahanova N.B., Berdenov ZH.G., Abil'dinov K.K., E.H. Mendybaev. Ocenka erozii pochv po modeli «RUSLE» bassejna reki ZHylandy// *Vestnik KazNU. Seriya Geograficheskaya*. – 2020 – Том 59, № 4, 56-69 p.

Vasil'chenko, N. I. Proyavlenie vodnoj erozii v pochvah Severnogo Kazahstana// *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Struktura i morfogenez pochvennogo pokrova v usloviyah antropogennogo vozdeystviya»*. Minsk – 2013. – S. 90–93.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. “Predicting rainfall erosion losses.” *Handbook*, no. 537. (2002): 65 p.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. “Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning.” *Agriculture Handbook*, no. 282. (1978): 242 p.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. “Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning.” *Agriculture Handbook*, no. 537. (1978): 47 p.

Ramazanova, N. “Modeling soil erosion in the Chagan river of the west Kazakhstan with using RUSLE and GIS tools.” *Journal of Environmental Biology*. Vikas Nagar. INDIA. (2020): 396-404 p.

Ian D. Moore and John P. “Wilson Length-slope factors for the Revised Universal Soil Equation: Simplified method of estimation.” *Journal of Soil and Water Conservation*. (1992): 58 p.

- P.J.J. Desmet and G. Govers. "A GIS procedure for automatically calculating the USLE factor on topographically complex landscape units." *Journal of Soil and Water Conservation* September. (1996)
- Renard, K.G, Foster, G., Weesies, G.A., Mccool, D.K., Yoder, D.C. "Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)". *Agricultural Handbook*, no 703. (2017).
- Schultz, R.C., Colletti, J.P., Isenhardt, T.M., Marquez, C.O., Simpkins, W.W. and Ball, C.J. "Riparian forest buffer practices." *North American Agroforestry: An integrated science and practices*. American Society of Agronomy. Chapter 7 (2000): 402 p.
- Turekhanov A. *Bases of effective use of natural pastures*. Science, 2016.
- Van Remortel, R.D., Maichle, R.W., Hickey, R.J. "Computing the LS Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through ArrayBased Slope Processing of Digital Elevation Data Using a C++ Executable." *Computers & Geosciences*, no. 30 (2004): 1043–1053 p.
- Willett, C.D., Lerch, R.N., Schultz, R.C., Berges, S.A., Peacher, R.D. and Isenhardt, T.M. "Streambank Erosion in Two Watersheds of the Central Claypan Region of Missouri, USA." *Journal of Soil and Water Conservation*. (2012).
- Akiyanova, F.ZH., Vasil'chenko, N.I. "Protsessy erozii i deflyatsii pochv Akmolinskoy oblasti v usloviyakh aglomeratsionnogo razvitiya regiona" [Processes of erosion and deflation of soils in Akmola region in the conditions of agglomeration development of the region] *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii Ekosistemy Tsentral'noy Azii v sovremennykh usloviyakh sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya* [Materials of the international conference Ecosystems of Central Asia in modern conditions of socio-economic development]. Ulan-Ude. (2015): p. 372–376.
- Voronin, A.D., Kuznecov, M.S. *Opyt ocenki protiverozionnoj stojkosti pochv* [Experience in assessing soil erosion resistance]. *Eroziya pochv i ruslovyje processy*. Moscow: Vyp. 1., 1970.
- Gavrilica, A.O. *Eroziionnye processy pri polive dozhdevaniem i puti ih minimizacii* [Erosion processes during sprinkling and ways to minimize them]. *Pochvovedenie*, № 1, 1993.
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. *Vetrovaya eroziya pochvy i zapylenie vozduha* [Wind soil erosion and air dusting]. Moscow: Fizmatlit, 2007.
- Dobrovol'skij, G.V. *Degradaciya i ohrana pochv: monografiya* [Soil degradation and protection: monograph]. Moscow: Izd-vo MGU, 2002.
- Zaslavskij, M.N. *Eroziovedenie : uchebnik dlya geogr. i pochv. spec, vuzov* [Erosiology: a textbook for geogr. and soils. specialist, universities]. Moscow: Vysshaya shkola, 1983.
- Zaslavskij, M.N. *Eroziya pochv* [Soil erosion]. Moscow: Mysl', 1979.
- Kuznecov, M.S., Glazunov, G.P., Zorina, E.F. *Fizicheskie osnovy erozii pochv* [Physical basis of soil erosion]. Moscow: MGU, 1992.
- Larionovt, G.A. *Eroziya i deflyaciya pochv : osnovnye zakonomernosti i kolichestvennyje ocenki* [Soil erosion and deflation: basic patterns and quantitative estimates]. Moscow: MGU, 1993.
- Makkaveev, N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* [River bed and erosion in its basin]. Moscow: AN SSSR, 1955.
- Mirckhulava, C.E. *Razmyv rusel i metodika ocenki ih ustojchivosti* [Erosion of channels and methods for assessing their stability]. Moscow: Kolos, 1967.
- Mirckhulava, C.E. *Inzhenernyje metody rascheta i prognoza vodnoj erozii* [Engineering methods for calculating and forecasting water erosion]. Moscow: Kolos, 1970.
- Mirckhulava, C.E. *Osnovy fiziki i mekhaniki erozii rusel* [Fundamentals of physics and mechanics of channel erosion]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988.
- Toxanbayeva, S.T., Ramazanova, N.E., Tusupbekov, Zh.A. "Ocenka erozii pochv po modeli «Rusle» [Assessment of soil erosion using the Rusle model]" *Vestnik KazNU. Seriya Geograficheskaya*. Tom 61, no. 2 (2021): 108-119 p. 29. D u r a s o v A.M., Tazabekov T.T. *Pochvy Kazahstana// Kollektivnaya monografiya*. – Alma-Ata, Kajnar, 1981 g. – 152 p.
30. Panagos, P., Ballabio, C., ...Beguiria, S., and Alewell, C.//Rainfall erosivity in Europe, *Science of the Total Environment*, 511, 801–814, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>, 2015a
31. Bajsholanov S.S.//*Agroklimaticheskie resursy Zapadno-Kazahstanskoj oblasti: nauchno-prikladnoj spravochnik* / Astana, 2017. – 128 p.
32. Lopyrev M.I., Ryabov E.I.//*Zashchita zemel' ot erozii i ohrana prirody: Uchebnoe posobie*. – M.: Agropromizdat, 1989. – 240 p.