

DOI: 10.26104/NNTIK.2022.24.24.008

Дуулатов Э.С., Аламанов С.К., Абдыжапар уулу С.

ЧҮЙ ОБЛУСУНУН ЧЫГЫШ БӨЛҮГҮНДӨГҮ СУУ ЭРОЗИЯСЫН
АРАЛЫКТАН БАЙКООНУН МААЛЫМАТТАРЫ БОЮНЧА БААЛОО

Дуулатов Э.С., Аламанов С.К., Абдыжапар уулу С.

ОЦЕНКА ВОДНОЙ ЭРОЗИИ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧУЙСКОЙ ОБЛАСТИ
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

E. Duulatov, S. Alamanov, Abdyzharpar uulu S.

ASSESSMENT OF WATER EROSION IN THE EASTERN PART OF THE
CHUI REGION BASED ON REMOTE SENSING DATA

УДК: 631.459.2

Топурак эрозиясы – биосферанын бардык аймактарында кездешүүчү олуттуу экологиялык жана экономикалык көйгөй. Ал жайыттарга да, табигый чөйрөгө да коркунуч туудурган жердин деградациясына өбөлгө түзөт. Бул изилдөө Чүй облусунун чыгыш бөлүгүндөгү суу эрозиясынын потенциалын аныктоого жана топурактын коромжу болушунун жалпы деңгээлин баалоого багытталган. Суу эрозиясынын коркунучтуу аймактарын бөлүштүрүүнүн картасын түзүү үчүн алыстан байкоо менен кайра каралган универсалдуу топурак жоготуу теңдемесинин (RUSLE) модели колдонулган. Изилдөөнүн жыйынтыктары көрсөткөндөй, орточо жылдык топурак эрозиясы $3,96 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$, топурактын жылдык жоготуусу $2,7 \times 10^6 \text{ т/жыл}$ болгон. Бардык аянт эрозия коркунучунун жети классына бөлүнгөн, $<0,1$ ден $>30 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$ га чейин. Алынган натыйжалар топурактын коромжудугун баалоодо жана айлана-чөйрөнү коргоодо баалуу практикалык мисалдар болуп саналат.

Негизги сөздөр: суу эрозиясы, тоолуу аймак, аралыктан байкоо, топурак жоготуу, Чүй облусу.

Эрозия почвы – серьезная экологическая и экономическая проблема, возникающая во всех регионах биосферы. И оно способствует деградации земель, подвергая опасности как пастбищную, так и природную среду. Данное исследование направлено на выявление потенциала водной эрозии в восточной части Чуйской области и оценку общей скорости потери почвы. Модель пересмотренного универсального уравнения потерь почвы (RUSLE) с дистанционным зондированием (ДЗ), использовалась для отображения распределения зон риска водной эрозии. Результаты исследования показывают, что среднегодовая эрозия почвы составляла $3,96 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, с годовой потерей почвы $2,7 \times 10^6 \text{ т/год}$. Вся территория была разделена на семь классов риска эрозии, от $<0,1$ до $>30 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Полученные результаты являются ценными практическими примерами при оценке потерь почвы и защиты окружающей среды.

Ключевые слова: водная эрозия, горная среда, дистанционное зондирование, потеря почвы, Чуйская область.

Soil erosion is a serious environmental and economic problem that occurs in all regions of the biosphere. And it contributes to land degradation, endangering both pasture and natural environments. This study is aimed at identifying the potential for water erosion in the eastern part of the Chui region and assessing the overall rate of soil loss. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model with remote sensing (RS) was used to map the distribution of water erosion risk areas. The results of the study show that the average annual soil erosion was $3.96 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, with an annual soil loss of $2.7 \times 10^6 \text{ t/yr}$. The entire area was divided into seven erosion risk classes, from <0.1 to $>30 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. The re-

sults obtained are valuable practical examples in assessing soil loss and environmental protection.

Key words: water erosion, mountain environment, remote sensing, soil loss, Chui region.

Введение. Эрозия почвы представляет собой сочетание экологических и антропогенных процессов, приводящих к изменению функций почвы в экосистеме, при деградации её структуры, свойств и режимов, а также снижению экологической и экономической ценности земель в целом [1]. Естественные горные и равнинные экосистемы развиваются в различных геоморфологических, климатических, гидрогеологических, мелиоративных и почвенных условиях. Перечисленные условия определяют естественные процессы деградации земель, такие как процессы эрозии, оползни, сели, наводнения, засухи, заморозки и засоление почв.

К сожалению, пространственный и численный расчет степени потери почвы в районах, где проводятся наблюдения, не всегда дает объективную информацию, в основном из-за ограниченности данных и существенных затрат [2-4]. Поэтому были разработаны многочисленные уравнения для прогнозирования процессов эрозии и деградации почвы. Модель пересмотренного универсального уравнения потерь почвы (RUSLE) [5] является методом, наиболее широко используемым во всем мире для оценки долгосрочной скорости эрозии. В последние годы использование дистанционного зондирования (ДЗ) и географических информационных систем (ГИС) в сочетании с моделью RUSLE в исследованиях потери почвы стало широко использоваться в различных масштабах.

В данной работе ставится научная задача пространственного анализа водной эрозии для выявления закономерностей их распространения. В результате была разработана карта распространения водной эрозии восточной части Чуйской области.

Материалы и методы. Сбор данных. В таблице 1 представлены основные материалы из различных источников. Все данные с разрешением $\geq 250 \text{ м}$ были повторно проецированы в зону N43 Всемирной геодезической системы (WGS) 1984 Universal Traverse Mercator (UTM). Чтобы создать карту потери почвы с высоким разрешением

полученные данные сопоставили со снимками с разрешением 90 м с помощью инструмента управления данными в программном обеспечении ArcGIS 10.2.

Таблица 1

Наборы данных с соответствующими пространственными разрешениями и источниками

Факторы	Данные	Источники
Климат	Среднегодовые месячные осадки (1998-2007)	Кыргызгидромет [6]
Почва	Песок, ил, глина, и органические вещества	Harmonized World Soil Data (HWSD) [7]
Рельеф	Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model (SRTM DEM)	United States Geological Survey (USGS) [8]
Растительность	MOD13Q1 - MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid	National Aeronautics and Space Administration (NASA) [9]
Землепользование	Land cover and land use	Global Land Cover Map (GlobeLand30) [10]

Модель RUSLE. Среднегодовую потерю почвы при помощи моделью RUSLE можно оценить следующим образом [5].

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

где A - расчетная средняя потеря почвы ($\text{т га}^{-1} \text{год}^{-1}$). R обозначает эрозионную активность осадков ($\text{МДж мм га}^{-1} \text{час}^{-1} \text{год}^{-1}$). K - фактор размываемости почвы ($\text{т ч МДж}^{-1} \text{мм}^{-1}$). LS - топографический фактор (без единицы измерения). C - фактор управления растительным покровом (без единицы измерения). P - фактор практики поддержки и сохранения (без единицы измерения). Эти факторы RUSLE описаны ниже:

Фактор эрозивности дождя (R). Эрозионная активность дождя была рассчитана для каждой из 35 метеостанций, после чего значения R -фактора были интерполированы методом Inverse Distance Weighted (IDW) с использованием инструментов Spatial Analyst Tools в программном обеспечении ArcGIS 10.2 за период 1998-2007 гг. Ренард и Фреймунд (1994) [11] предложили следующие уравнения для оценки эрозионной активности дождя с использованием годовых данных об осадках, когда данные об осадках (EI30) для конкретных участков недоступны.

$$R = 0.04830 \times P^{1.61}, \text{ где } P < 850 \text{ мм} \quad (2)$$

где R - эрозионная активность осадков ($\text{МДж мм га}^{-1} \text{час}^{-1} \text{год}^{-1}$), P - среднее годовое количество осадков. Данные были использованы для определения эрозии осадков от Кыргызского гидрометеорологического агентства [6].

Фактор эродуемости почвы (K). Эродуемость почвы – это фактор, указывающий на восприимчивость почвы к брызгам дождевых капель и воздействию поверхностных водотоков [12]. Данные о почвах были получены из Усредненных мировых данных о почвах (HWSD). Эродуемость почвы влияет на перенос отложений и восприимчивость почвы к эрозии. Ян и др. (2003) [13] предложили уравнение (3) ниже.

$$K = \frac{1}{7.6} \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \left(1 - \frac{0.25OM}{OM + \exp(3.72 - 2.95OM)} \right) \left(1 - \frac{0.75SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9SN)} \right) \quad (3)$$

где $SN = 1 - SAN / 100$ и $SAN\%$ содержание песка, $SIL\%$ содержание ила, $CLA\%$ содержание глины и OM - процентное содержание органического вещества.

Фактор длины и крутизны склона (LS). Фактор LS отражает влияние топографии на эрозию почвы [14]. Слой LS был получен на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM 90 м (Таблица 1). Морган (2009) [15] применяет уравнение (4) для расчета комбинированных LS фактором.

$$LS = (FA \times \frac{l}{22.13})^{0.5} \times (0.065 + 0.045 \times S + 0.0065 \times S^2) \quad (4)$$

где FA -накопление потока, l -длина склона (M), S -процент наклона.

Фактор управления растительным покровом (C). Результаты расчета коэффициента C на основе данных ДЗ основаны на Нормализованном индексе разницы растительности (NDVI). Фактор C сравнивает потерю почвы из-за определенного типа земного покрова. NDVI описывается уравнением (8) [16].

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (5)$$

где Red – это видимый красный цвет, а NIR - измерения спектральной отражательной способности в ближней инфракрасной области. Уравнение (6) использовалось для получения коэффициента определенного ландшафта [17].

$$C = 0.1 \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right) \quad (6)$$

Был использован Спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS) NDVI для вегетационного периода (май-август 2020 г.).

Фактор природоохранной практики (P). Фактор природоохранной практики – это соотношение потери почвы с точной опорой на урожай по сравнению с соотношением прямолинейного земледелия вверх и вниз [5]. Землепользование и земельный покров (LULC) 2020, загружено с 30-метрового глобального информационного продукта о земном покрове - портала GLOBE Land30 (табл. 2).

Таблица 2

Значения фактора P в восточной части Чуйской области по типам земельного покрова и землепользования

Типы землепользования	P фактор	Литература
Пахотные земли	0.4	[18-20]
Лесная земля	1	[13-20]
Пастбища	0.8	[21]
Кустарник	0.8	[21]
Водно-болотные угодья	0.9	[21]
Водоёмы	0	[18, 22, 23]
Искусственные поверхности	0.9	[21, 22]
Бесплодная земля	1	[13]
Постоянный снег и лед	0	[18, 23]

Результаты и их обсуждение. Анализ факторов эрозии. Карты факторов RUSLE в восточной части Чуйской области показаны на рисунке 1. Самая высокая годовая эрозионная активность осадков была обнаружена в западной и северо-западной частях Чуйской области. Средние значения были определены в северной и южной частях. Самые низкие значения были обнаружены на востоке. Расчетный среднегодовой R-фактор колеблется от 289,50 МДж мм га⁻¹ час⁻¹ год⁻¹ до 1272,84 МДж мм га⁻¹ час⁻¹ год⁻¹. Средний R-фактор составил 886,39 МДж мм га⁻¹ час⁻¹ год⁻¹ со стандартным отклонением 276,68 МДж мм га⁻¹ час⁻¹ год⁻¹.

Фактор эродированности почвы количественно носит унифицированный характер и зависит от типа почвы, от физических и химических свойств, которые способствуют её эродированности. На рисунке 1 показано, что коэффициент K в области колеблется от 0,0195 до 0,0209 т ч МДж⁻¹ мм⁻¹.

Средняя эродированность составила 0,020 т ч МДж⁻¹ мм⁻¹.

Топографический фактор – это производное от длины склона и по крутизне. Крутой блок имеет большой уклон. Значения коэффициента LS варьируются от 0,03 до 41,18. Средний фактор LS составил 10,81 со стандартным отклонением 9,15. Длина и угол наклона являются определяющими факторами в процессе эрозии. Чем длиннее и круче склон, тем важнее фактор накопления поверхностного стока, что приводит к увеличению потерь почвы.

Фактор управления растительным покровом был рассчитан NDVI для получения более точной информации о плотности растительного покрова. Он характеризует лучшую пространственную изменчивость по C-фактору. Оценки значения C для восточной части Чуйской области варьируются от 0,007 до 0,053. Среднее значение составило 0,030 со стандартным отклонением 0,010. Пространственное

распространение фактора определение ландшафта, которое задается NDVI, показано на рисунке 1. Для восточной части Чуйской области фактор

управленческой практики (P) был получен из значения земельного покрова. Значения P-фактора варьируются от 0,0 до 1,0 при среднем значении 0,73.

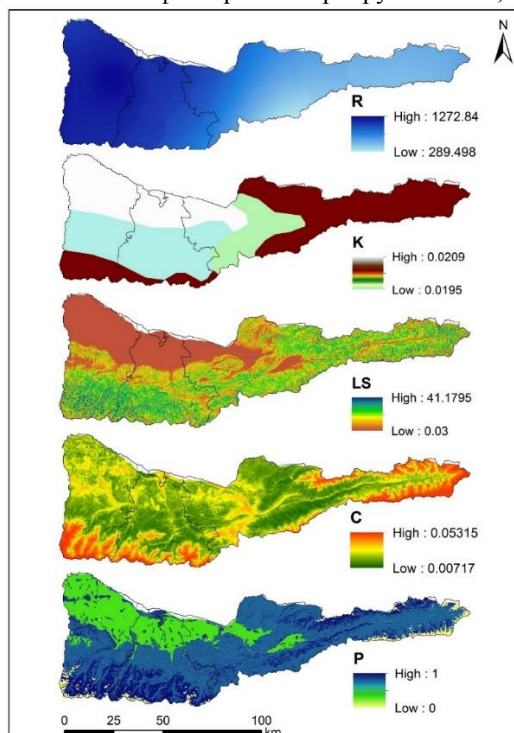


Рис. 1. Факторы RUSLE: а) эрозионная активность осадков, б) эрозионность почвы, в) длина и крутизна склона, г) управление покровом, д) практика сохранения.

Оценка потенциала эрозии в восточной части Чуйской области. Результаты данного исследования показывают, что территория восточной части Чуйской области подвержена водной эрозии. Сложный ландшафт и влияния сурового полусухого климата в сочетании с зачастую плохо контролируемых методов выпаса скота, делают природную среду в значительной степени уязвимой. Среднегодовая скорость эрозии почвы, варьируется от 0,00 до 50,26 т га⁻¹ год⁻¹, при средней годовой эрозии почвы 3,96 т га⁻¹ год⁻¹. Ежегодная потеря почвы в восточной части Чуйской области составляет $2,7 \times 10^6$ т/год. На основе минимальных и максимальных значений результатов рассчитанные среднегодовые потери почвы в восточной части Чуйской области были сгруппированы в семь классов (табл. 3). Пространственное распространение каждого класса показано на рисунке 2.

Таблица 3

Скорость эрозии почв и ее доля

№	Скорость эрозии почвы (т га ⁻¹ год ⁻¹)	Площадь (км ²)	Средняя эрозия почвы (т га ⁻¹ год ⁻¹)	Среднеквадратичное отклонение (т га ⁻¹ год ⁻¹)	Доля площадей эрозии каждого модуля потерь (%)
1.	<0.1	1161.61	0.29	2.16	17.06
2.	0.1–1	1376.78	0.40	0.33	20.22
3.	1–5	2543.28	2.88	1.25	37.35
4.	5–10	1019.21	6.86	1.77	14.97
5.	10–20	493.2	12.99	3.66	7.24
6.	20–30	164.95	22.91	4.51	2.42

7.	>30	48.52	31.29	7.29	0.71
----	-----	-------	-------	------	------

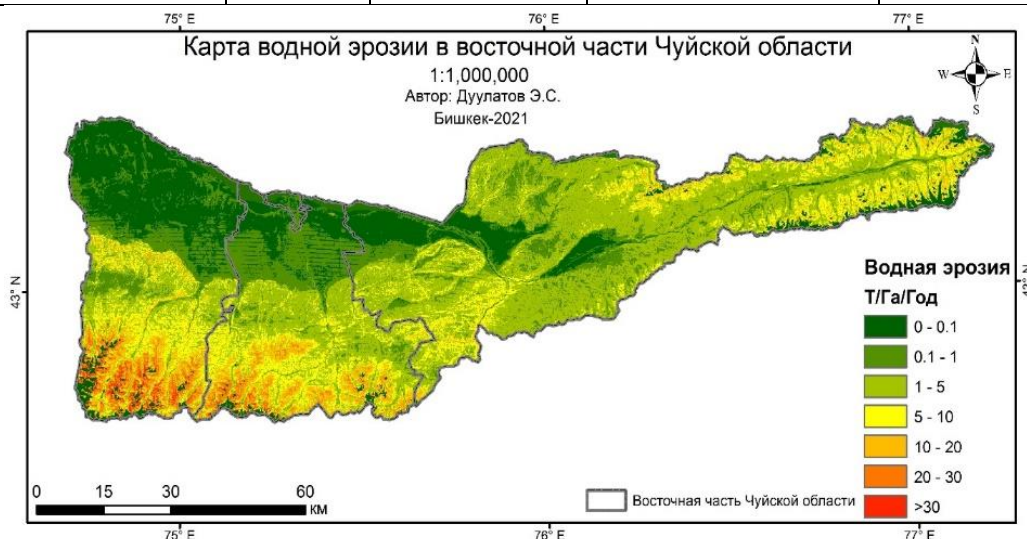


Рис. 2. Карта водной эрозии в восточной части Чуйской области.

Таблица 4

Средняя скорость эрозии почвы административных районов восточной части Чуйской области

Районы	Площадь (км ²)	Средняя эрозия почвы (т га ⁻¹ год ⁻¹)
Кемин	3343.30	2.97
Ысык-Ата	1866.48	4.89
Чуй	1590.10	5.01
Город Токмок	278.00	0.14

Заключение. В представленных результатах исследования, количественная оценка среднегодовой эрозии почвы в восточной части Чуйской области осуществлялась с использованием известного уравнения RUSLE на основе ДЗЗ, и ГИС с учетом количества осадков, типа почвы, растительного покрова, вида землепользования и топографических данных. Контраст рельефа имеет высокий коэффициент LS, а районы с выпадением большого количества осадков более уязвимы для эрозии почвы.

Результаты показывают, что среднегодовая эрозия почвы, оцененная с помощью модели RUSLE, составляла от $0,1$ до 30 т га⁻¹ год⁻¹, средняя эрозия почвы 3,96 т га⁻¹ год⁻¹. Ежегодная потеря почвы составляет $2,7 \times 10^6$ т/год. Отмечено, что степень эрозии в основном зависит от топографии и количества осадков. В таких районах необходимо применять передовые методы охраны почв. Методология RUSLE, основанная на ГИС и ДЗ, эффективно используется для определения пространственного распределения водной эрозии.

Результаты исследований помогут выработать стратегию и принять меры для борьбы с эрозией почвы в районах с наиболее интенсивно протекающими

природными процессами и чрезмерной сельскохозяйственной деятельностью.

Литература:

1. Хитров Н., Иванов А., Завалин А., Кузнецов М. Проблемы деградации, охраны и пути восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения. / Вестник аграрной науки. - 2007. - Т. 9. - № 6.
2. Mukanov Y., Chen Y., Baisholanov S., Amanambu A. C., Issanova G., Abenova A., Fang G., Abayev N. Estimation of annual average soil loss using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrated in a Geographical Information System (GIS) of the Esil River basin (ERB), Kazakhstan // Acta Geophysica. – 2019.10.1007/s11600-019-00288-0.
3. Duulatov, E., Pham, Q.B., Alamanov, S., Orozbaev, R., Issanova, G. and Asankulov, T., Assessing the potential of soil erosion in Kyrgyzstan based on RUSLE, integrated with remote sensing. // Environmental Earth Sciences, 80(18), pp.1-13. 2021.
4. Current and future trends of rainfall erosivity and soil erosion in Central Asia. / Duulatov, E., Chen, X., Issanova, G., Orozbaev, R., Mukanov, Y. and Amanambu, A.C., Springer, Cham. 2021.
5. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). / Renard K. G., Foster G.R., Weesies G., McCool D., Yoder D.: United States Department of Agriculture Washington, DC, 1997.

6. Ryskal M. O. Estimation of the amount of precipitation in the territory of Kyrgyzstan based on satellite observations; Kyrgyz-Russian Slavic University. – Bishkek, 2020. – 173 p.
7. Nachtergaele F., van Velthuisen H., Verelst L., Batjes N., Dijkshoom K., Van Engelen V., Fischer G., Jones A., Montanarella L., Petri M. Harmonized world soil database (version 1.1) // FAO, Rome, Italy & IIASA, Laxenburg, Austria. – 2009.
8. Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4 // . – 2008.
9. Didan K. MOD13Q1 MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 250m SIN grid V006 // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. – 2015.
10. Jun C., Ban Y., Li S. Open access to Earth land-cover map // Nature. – 2014. – T. 514, № 7523. – P. 434-434.
11. Renard K. G., Freimund J. R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE // Journal of hydrology. – 1994. – T. 157, № 1-4. – P. 287-306.
12. Kulikov M., Schickhoff U., GrÖNgrÖft A., Borchardt P. Modelling soil erodibility in mountain rangelands of southern Kyrgyzstan // Pedosphere. – 2020. – T. 30, № 4. – P. 443-456.
13. Yang D., Kanae S., Oki T., Koike T., Musiake K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes // Hydrological processes. - 2003. - T. 17, № 14. - P. 2913-2928.
14. Morgan R., Morgan D., Finney H. A predictive model for the assessment of soil erosion risk // Journal of agricultural engineering research. - 1984. - T. 30. - P. 245-253.
15. Desmet P., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // Journal of soil and water conservation. – 1996. – T. 51, № 5. – P. 427-433.
16. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. - 1978.
17. Almagro A., Thomé T.C., Colman C. B., Pereira R.B., Marcato Junior J., Rodrigues D. B. B., Oliveira P. T.S. Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions // International Soil and Water Conservation Research. - 2019. - T. 7, № 4. - P. 325-334.
18. Wang L., Zhang F., Fu S., Shi X., Chen Y., Jagirani M. D., Zeng C. Assessment of soil erosion risk and its response to climate change in the mid-Yarlung Tsangpo River region / Environmental Science and Pollution Research. - 2020. - T. 27, №1. - P. 607-621.
19. Jiu J., Wu H., Li S. The implication of land-use/land-cover change for the declining soil erosion risk in the three Gorges reservoir region, China // International journal of environmental research and public health. - 2019. - T. 16, № 10. - P. 1856.
20. Teng H., Liang Z., Chen S., Liu Y., Rossel R. A. V., Chappell A., Yu W., Shi Z. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models // Science of The Total Environment. - 2018. -T. 635. - P. 673-686.
21. Haregeweyn N., Tsunekawa A., Poesen J., Tsubo M., Meshesha D. T., Fenta A. A., Nyssen J., Adgo E. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River // Science of the Total Environment. – 2017. – T. 574. – P. 95-108.
22. Gupta S., Kumar S. Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model - A case study in a watershed of mid-Himalayan landscape // Journal of Earth System Science. - 2017. - T. 126, № 3. - P. 43.
23. Gafforov K. S., Bao A., Rakhimov S., Liu T., Abdullaev F., Jiang L., Durdiev K., Duulatov E., Rakhimova M., Mukanov Y. The Assessment of Climate Change on Rainfall-Runoff Erosivity in the Chirchik–Akhangaran Basin, Uzbekistan // Sustainability. – 2020. – T. 12, № 8. – P. 3369.
24. Аламанов С.К., Ли Яоминг, Абдыжапар уулу С., Сатаров С.С. Исследование качества вод рек Иссык-Кульской котловины. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2019. № 4. С. 20-22.
25. Сатаров С.С., Аламанов С.К., Абдыжапар уулу С., Ли Яоминг ГИС-модель бассейнов рек Кочкорской долины (Гидрография и морфометрия). / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2019. № 4. С. 61-64.
Алибаева Г.К., Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Методика дистанционного зондирования со спутников во внутренних водоемах (озеро Иссык-Куль). / Известия ВУЗов Кыргызстана. 2016. №. 3. С. 3-8.