

Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Ғылым жаршысы: пәнаралық = Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина: междисциплинарный. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2025. - № 2 (125). - Р.40-53. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

doi.org/ 10.51452/kazatu.2025.2(125).1864

ӘОЖ 631. 45:550.47:528.9

Зерттеу мақаласы

ГАЗ технологиясын және RUSLE моделін пайдалана отырып, топырақ эрозиясын бағалау

Унышева Н.К.¹ , Макенова С.К.¹ , Жагипарова Т.Т.¹ , Татаринцев В.Л.² 

¹С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Астана, Қазақстан,

²Мемлекеттік Томск ұлттық зерттеу университеті, Томск, Ресей Федерациясы

Корреспондент-автор: Унышева Н.К.: nurlygul_kosherbayevna@mail.ru

Бірлескен авторлар: (1: СК) saule_makenova@mail.ru; (2: ТЖ) tolkin_69@mail.ru;
(3: ВТ) kafzem@bk.ru

Қабылданған күні: 10-02-2025 **Қабылданды:** 10-06-2025 **Жарияланды:** 30-06-2025

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Қазіргі таңда топырақ эрозиясы қоршаған ортаға көптеген зардабын тигізуде. Ауыл шаруашылығы саласында топырақ эрозиясы (жел және су эрозиясы) және антропогендік іс-әрекеттер топырақ деградациясына алып келіп, оның құнарлы қабатының жойылуына әсер етуде. Осыған орай, зерттеудің мақсаты геоакпараттық жүйелер мен RUSLE моделінің интеграциясы негізінде Ақмола облысы Есіл ауданының су эрозиясына шалдыққан жерлерінің жағдайын зерттеу.

Материалдар мен әдістер. Талдау барысында келесідей көрсеткіштер мен коэффициенттер қарастырылды: R – жауын-шашынның түсу мөлшері; K – топырақтың эрозияға төзімділігі коэффициенті; LS – еңістіктің ұзындығы мен тіктігін сипаттайтын коэффициенті; C – өсімдік жамылғысының факторы; P – эрозияға қарсы қолданылатын шаралар және басқада көрсеткіштер қолданылды.

Нәтижелер. Талдаудың нәтижесі бойынша, аудандағы топырақтың құнарлы қабатының шайылуы орташа деңгейде ($3,2 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$) екені анықталды. Жалпы зерттеу объектісінде жылына шамамен 90,7% ($0-20 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$ аралығында) төмен немесе орташа деңгейде топырақтың құнарлы қабаты шайылады, ал максималды топырақ құнарлы қабатын жоғалтуы 9,3% ($40 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$) дейін жетеді.

Қорытынды. Ұсынылған эрозияны бағалау әдісі топырақ эрозиясы кеңістікте таралу процестерін толық игеруге мүмкіндік береді, топырақ эрозиясының болашақта қалыптасуын дәстүрлі бағалау әдісіне қарағанда жақсырақ анықтайды, сонымен қатар топырақты тұрақты басқару мақсатында тиімді қолдануға ықпал етеді

Кілт сөздер: топырақ эрозиясы; RUSLE моделі; ГАЗ; бедердің сандық моделі; ауыл шаруашылығы алаптар; құнарлы қабат.

Кіріспе

Жалпы жер бетінің 60% дейін бөлігі деградацияға ұшыраған, жердің құнарлығының төмендеуі, соның ішінде топырақ эрозиясы, жер пайдаланушылар үшін маңызды мәселелердің бірі болып табылады [1, 2, 3]. Ғалымдардың зерттеу нәтижелері бойынша, жыл сайын жердің үстіңгі қабаты жер эрозиясының салдарынан 1,7 мм жоғалады, ал бірақ 1 см топырақтың қалыптасуына шамамен 100 жыл қажет [4]. Сонымен қатар, топырақ құрылымының бұзылуы,

оның үстіңгі құнарлы қабатының жойылуы және топырақ агрегаттарының шайылуы (жоғары тербеліс амплитудасы мен судың нашар сіңуіне байланысты) ауыл шаруашылығы жүйелерінің тұрақтылығын айтарлықтай әлсіретеді [5, 6, 7].

Дүниежүзі бойынша жердің құнарлы қабатының жойылуы шамамен 84% топырақ эрозиясы процестерінің салдарынан болады [3]. Сапалы сараптаманың нәтижесі бойынша, Қазақстан Республикасында 90 млн га астам эрозияға ұшыраған және эрозия қаупі бар жерлер есепке алынған, оның ішінде нақты эрозияға ұшыраған жерлер – 29,3 млн га құрайды [8]. Су эрозиясы Республиканың барлық облыстарында байқалады және оның қарқынды дамуы келесі факторларға байланысты: жер бедеріне (еңістің тіктігі мен ұзындығы, су жинау алаңының мөлшері мен пішіні); жауын-шашын мөлшеріне; топырақтың түрі мен механикалық құрамына (карбонаттылық, тұздылық); жер асты суының тереңдігіне; су өткізгіштікке және жер пайдалану тәртібіне [8].

Қазіргі заманауи геокеңістіктік технологиялар мен географиялық ақпараттық жүйелер (бұдан әрі – ГАЖ) саласындағы жаңа әзірлемелер эрозиялық процестерді өзен алаптары деңгейінде өлшеу және талдау үшін тиімді әдістер мен құралдарды айтарлықтай жетілдірді. Сандық жер бедері моделінің мәліметтері, қашықтықтан зондтау деректері, ГАЖ құралдарымен және негізгі физикалық факторлармен (геология, топырақ жер бедерінің морфологиясы, климаттық жағдайлар сияқты) біріктіру арқылы эрозияның аймақтық тәуекелін дәлірек анықтауға және өзен алаптарындағы топырақ эрозиясы процестерін модельдеуге мүмкіндік береді [9, 10]. Бұл тәсілдер эрозиялық процестерді мониторингтеу, олардың динамикасын түсіну және тиімді қорғаныс шараларын әзірлеу үшін маңызды құрал болып табылады.

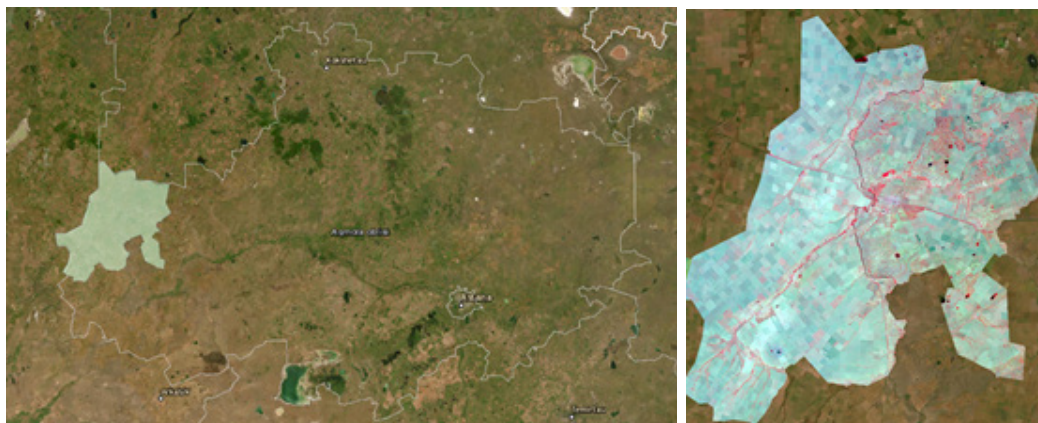
Қазіргі кезде топырақ эрозиясы – ауыл шаруашылығы жерлерінің құнарлылығын төмендететін, экожүйелердің тұрақтылығын бұзатын және адам әрекетінің салдарынан қарқынды дамитын глобалды экологиялық мәселелердің бірі. Зерттеудің жаңалығы – эрозиялық процестерді бағалауда заманауи геоақпараттық технологияларды (сандық бедер моделі, қашықтықтан зондтау) және RUSLE моделін интеграциялау арқылы дәлдікті арттыру, сондай-ақ эрозияның тәуекелді аймақтарын анықтауға мүмкіндік беретін кеңістіктік талдау әдістемесін құру. Нәтижелер топырақты қорғау және жер пайдаландыру бойынша тиімді шешімдер қабылдауға негіз болады. Сонымен қатар, бұл тәсілдер климаттың өзгеруіне байланысты эрозиялық процестердің күшеюі сияқты заманауи мәселелерді шешуге көмектеседі.

Материалдар мен әдістер

Топырақ эрозиясын бағалау үшін көптеген зерттеушілер әртүрлі модельдер әзірлеген. Олар эмпирикалық, концептуалды және физикалық модельге бөлінеді. Бұл модельдер күрделілігі, деректерге қойылатын талаптары, қарастырылатын процестері және калибровкалау әдістері бойынша бір-бірінен ерекшеленеді [11]. Осы модельдердің қатарына статистикалық модельдер, жалпыланған топырақтың құнарлы қабатының шайылу теңдеуі (Universal Soil Loss Equation, USLE) [10, 12] және жалпыланған топырақтың құнарлы қабатының шайылу теңдеуінің қайта қаралған нұсқасы (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) [10, 16], топырақ пен суды бағалау құралы (Soil and Water Assessment Tool, SWAT) [12] жатады.

Жерді қашықтықтан зондтау мен ГАЖ жердің сипаттамаларын алуға, талдауға және өңдеуге өте қолайлы [13]. ГАЖ топырақтың құнарлы қабатының шайылуын қарастыратын жаңартылған нұсқасы RUSLE моделімен біріктірілуі топырақ эрозиясын кеңістікте бағалау үшін негізгі құралдар ретінде пайдалануға мүмкіндік береді [14, 16]. RUSLE моделі он жыл бойы кеңінен қолданылып, тексеріліп келеді, сонымен қатар оның шектеулері жақсы құжатталған [14, 15]. Осылайша, спутниктік деректер мен ГАЖ технологияларын RUSLE моделімен біріктіру топырақ эрозиясын тиімді бағалау мен басқаруға мүмкіндік береді.

Ғылыми мақалада Ақмола облысы Есіл ауданында су жинайтын алқабының аумағында топырақтың құнарлы қабатының шайылуы бағаланды. Талдау үшін әртүрлі деректер біріктірілді, оларға спутниктік суреттер, жер бедерінің сандық модельдері (ЖБСМ), топырақ карталары және жауын-шашын мөлшері туралы ақпарат есепке алынды (1-сурет).



1-сурет – Зерттеу аймағы - Ақмола облысы Есіл ауданы

RUSLE моделі – ауыл шаруашылығында, экологияда және табиғи ресурстарды басқаруда топырақтың құнарлы қабатын жоғалтуын болжау мен оның азайту шараларын әзірлеу үшін кеңінен қолданылады [14].

RUSLE моделі орташа жылдық топырақтың құнарлы қабатының жойылуын (A) бес фактор арқылы есептейді:

1. R-фактор – жауын-шашынның эрозиялық белсенділік факторы. Жауын-шашынның энергиясын және эрозияны тудыру қабілетін көрсетеді. Ол бір жылдық және әр айдың параметрлық мәліметтерді қоса отырып жауын-шашынның интенсивтілігі мен мөлшеріне байланысты есептеледі [17].

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.753 \times 10^{(1.5 \log(P_i/P) - 0.08188)} \quad (1)$$

Мұнда: R – жылдық жауын-шашынның эрозиялық күшінің коэффициенті, МДж·мм·га⁻¹·сағ⁻¹ жылына;

P - жылдық орташа жауын-шашын мөлшері, мм;

P_i - айлық орташа жауын-шашын мөлшері, мм.

R-фактордың мәні климаттық жағдайларға байланысты өзгереді (жиі және қарқынды жауын-шашынды аймақтарда R-фактордың мәні құрғақ аймақтарға қарағанда жоғары болады). Қазақстанда R-фактордың мәні уақыт өте келе өзгеріп отырады, әсіресе нөсерлі жауын-шашын кезеңдерінде. R-фактор топырақ эрозиясының тәуекелін бағалауда негізгі компонент болып табылады, өйткені ол жауын-шашынның эрозиялық процестері басталуына қосқан үлесін анықтайды.

2. K-фактор – топырақтың эрозияға төзімділік факторы. Ол топырақтың құрылымына, органикалық заттардың мөлшеріне, құрамына және су өткізгіштігіне байланысты. K-фактор т·га·МДж⁻¹·мм⁻¹ бірлігінде өрнектеледі, яғни бір га жерден эрозиялық жауын-шашын энергиясы әсерінен шайылған топырақтың тоннамен мөлшері.

K-фактор топырақтың бірнеше қасиеттеріне байланысты есептеледі: топырақтың текстурасы, топырақтың құрылымы, органикалық заттар, су өткізгіштік қасиеті [11].

Біріккен ұлттар ұйымының Азық-түлік және ауыл шаруашылығы ұйымының (ФАО) халықаралық топырақ туралы анықтамалық орталық деректерінің негізінде DSMW (Дүниежүзілік топырақтың цифрлық картасы) дерекқорын пайдаланып, ArcGIS 10.4.1 бағдарламасы арқылы, топырақтың төрт сипаттамасы алынып, қарастырылып отырған объект бойынша эрозияға бейімді картасы құрылды. Топырақтың эрозияға бейімділігін анықтау үшін Уильямс формуласы (1995 ж.) қолданылды, бұл формуланы бірнеше зерттеушілер кеңінен өздерінің жұмыстарында пайдаланған [12].

Қазақстанда K-фактордың мәні аймаққа байланысты өзгереді. Мысалы, далалы аймақтарда органикалық заттардың жоғары мөлшері бар топырақтардың K-факторы төмен, ал шөлейт және шөл аймақтардағы құмды топырақтарда жоғары болады, яғни эрозияға бейімдірек.

3. LS-фактор (еңіс ұзындығы мен тіктігі факторы). Еңіс ұзындығы мен тіктігі су ағынының жылдамдығына және эрозияға әсерін есепке алады. Еңіс неғұрлым ұзын және тік болса, эрозия тәуекелі соғұрлым жоғары болады [16].

LS-фактор келесі формула бойынша анықталады:

$$LC = \left(\frac{L}{22.13} \right)^m \times (0.065 + 0.045 \times S + 0.0065 \times S^2) \quad (2)$$

Мұнда: L - еңістің ұзындығы, м;

S - еңістің бұрышы, °;

m және n – тәуелді коэффициенттер, олар топырақтың эрозияға бейімділігіне байланысты.

Бұл формула еңістің ұзындығы мен бұрышының эрозияға әсерін есепке алады. Мысалы, ұзын және тік еңістерде топырақтың шайылуы жоғары болады, сондықтан LS-фактордың мәні де жоғары болады.

SRTM DEM деректері LS-факторды есептеу үшін пайдаланылады, өйткені олар жер бедерінің дәлдігін жоғары деңгейде көрсетеді. Бұл деректер эрозиялық процестерді модельдеуге және топырақтың эрозияға бейімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Әдіс алдымен ArcGIS бағдарламасының ArcMap қосымшасындағы Spatial Analyst құралын пайдаланып, еңіс және су ағынын жинау картасы құрастырылады. Екіншіден, ГАЗ бағдаламасында БСМ-нің әрбір растрлық ұяшығы пиксел арқылы еңістерді жеке сегмент ретінде өңдеу арқылы жалғасады [18].

4. C-фактор – өсімдік жамылғысы және ауыл шаруашылығы алаптары арқылы анықталатын фактор. Өсімдік жамылғысы мен жерді пайдалану әдістері эрозияға әсерін тигізеді. Өсімдік жамылғысы неғұрлым көп болса, топырақтың құнарлы қабатын жоғалтуы соғұрлым аз болады [11].

Өсімдік жамылғысы судың әсерінен топырақтың құнарлы қабатының шайылуына әсер ететін маңызды факторлардың бірі болып саналады. Өсімдік жамылғысы мен ауыл шаруашылығы алаптар түрлері ғарыштық суреттерді жіктеу арқылы, мақсатты кластар жиынтығын ескере отырып жүргізіледі. Мұндай жиынтық «жіктеу жүйесі» деп аталады. Бұл жүйенің мақсаты деректерден алынған ақпаратты ұйымдастыру және санаттау үшін құрылымды қамтамасыз ету болып табылады [14]. Бұл зерттеуде жалпы жіктеу «бақыланатын әдіс» арқылы жүзеге асырылады. Сонымен қатар, ең ықтималды жіктеу - MLC әдісі қолданылады, ол кіріс кескін қабатын файл сигнатурасын пайдалана отырып жіктейді. Әрбір пиксельдің бір класқа жататын ықтималдығы есептеледі. Алынған тағайындау ережесі қателіктердің тәуекелін азайтуға мүмкіндік береді.

5. P-фактор – эрозияға қарсы шаралар факторы. Эрозияны азайту үшін қолданылатын шараларды есепке алады, мысалы, контурлы жер өңдеу, террасалар құру немесе буферлік аймақтар жасау.

P-фактор мәндері 0-ден 1-ге дейін коэффициент арқылы көрсетіледі:

0 - топырақтың максималды қорғалуы (эрозияны болдырмаудың тиімді шаралары);

1 - эрозияға қарсы шаралардың жоқтығы.

P-фактордың мәні 0-ге неғұрлым жақын болса, топырақты қорғау шаралары соғұрлым жақсы жүзеге асырылған дегенді білдіреді [14].

Қазақстанның далалы аймақтарында тегіс жер бедері, сондықтан P-факторы әдетте агротехникалық шаралар арқылы төмендейді. Мысалы: механикалық әдіс - егістіктерді топырақ ағындарына қарсы бағытта өңдеу; биологиялық әдіс - ағаш немесе бұталарды отырғызу арқылы эрозияны болдырмау [19].

Бұл шаралар топырақтың эрозиядан қорғалуына ықпал етеді және P-фактордың мәнін төмендетеді. Осылайша, P-фактор топырақты қорғау шараларының тиімділігін бағалау үшін маңызды көрсеткіш болып табылады.

RUSLE моделінің формуласы келесідей:

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

Мұнда: A- орташа жылдық топырақ жоғалтуы (тонна/га/жыл);

R - жауын-шашын эрозиялық белсенділік факторы;

К - топырақтың эрозияға төзімділік факторы;

LS - еңіс ұзындығы мен тіктігі факторы;

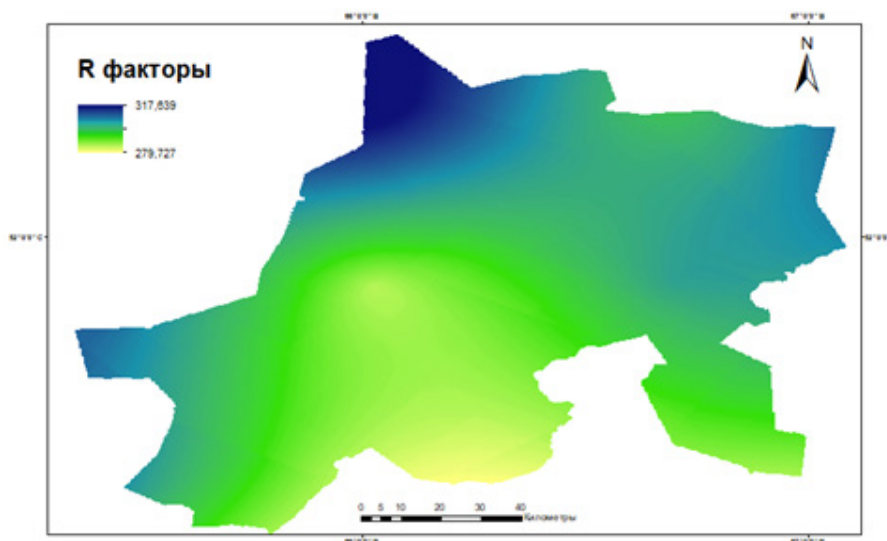
С - өсімдік жамылғысы факторы;

Р - эрозияға қарсы шаралар факторы [20].

RUSLE моделін топырақ эрозиясын бағалау, жерді пайдалануды жоспарлау үшін қолдануға болады. Модель белгілі бір аумақта эрозияның қаншалықты қарқынды екенін бағалауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

2021-2023 жылдардың жауын-шашын мәліметтері бойынша 36 канал өңделді. Ақмола облысы Есіл ауданы бойынша орташа жылдық жауын-шашын 279,73 және 317,64 мм арасында ауытқыды (2-сурет). Жылдық жауын-шашын эрозиялық күшінің коэффициенті 84 тен 368 МДж·мм·га⁻¹·сағ⁻¹. Солтүстік шығыс және солтүстік батыс бөлігінде топырақ эрозиясының жауын-шашын әсерінен болу қаупі жоғарырақ. R-фактордың төмен және қанағаттандырылғыш көрсеткіші (84 ден 200 МДж мм с-1 жылына-1) ауданның 54,35% алып жатыр.



2-сурет – Ақмола облысы Есіл ауданының жауын-шашынның эрозиялық белсенділігінің таралуы

Кеңістіктік эрозияланудың таралуын ArcGIS-тегі геостатистикалық Analyst құралын қолданып К-факторының екі түрлі топырақ қабаттары анықталды – кәдімгі қарашірікті қара топырақ пен карбонатты күңгірт-қара қоңыр топырақтар [12]. Топырақ эрозиясының таралу коэффициенті 0,1185-0,1284 т/га МДж-1 мм-1-ге дейінгі аралықта (3-сурет). Топырақ органикалық заттардың, құмдақтар пен саздың төмен мөлшерімен сипатталады. Бұл текстура топыраққа жақсы макроқопқытқыш және су өткізгіштік қасиет береді.



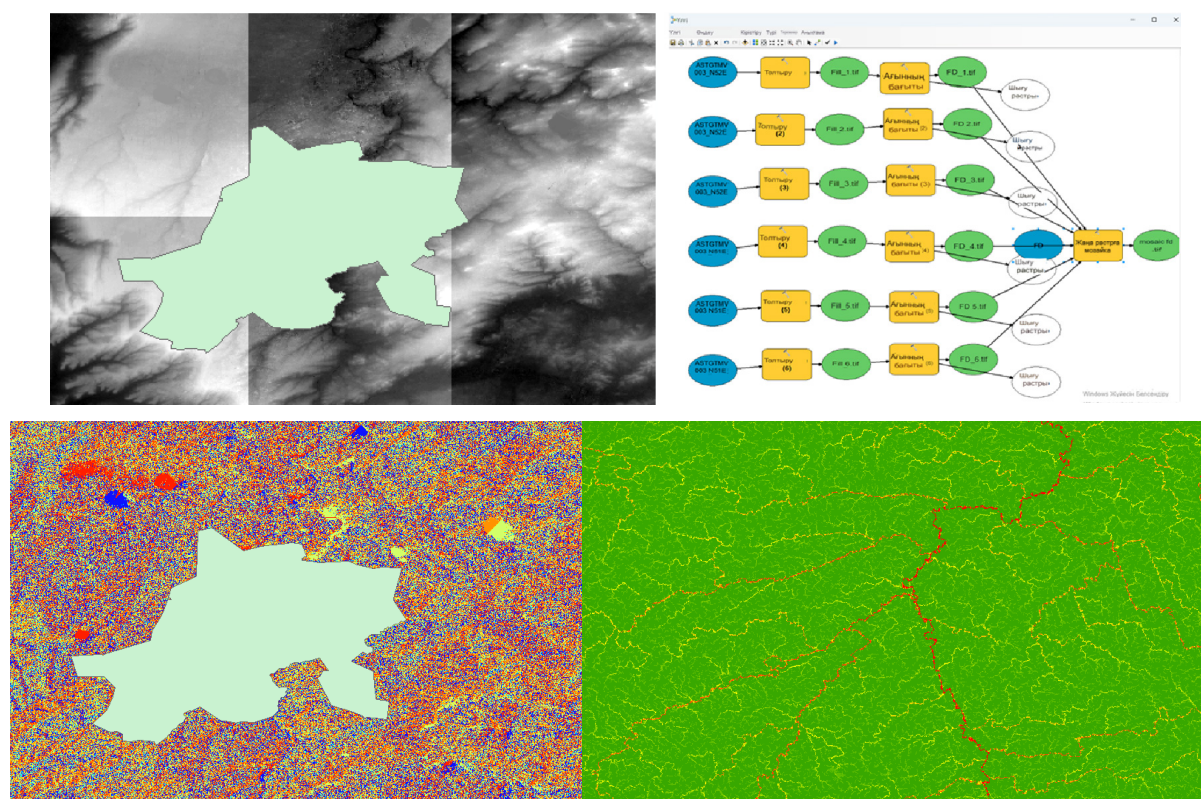
3-сурет – Ақмола облысы Есіл ауданының топырақ эрозиясының таралу коэффициенті

Ең жоғары эрозиялану мөлшері К мәні 0,1284, ол объектінің 73% құрайды. К мәнінің жоғары болуы топырақ эрозиясының пайда болуына ықпал етеді (1-кесте). Топырақ жамылғысы, топырақ түзілу факторларының өзгеруіне және антропогендік жағдайларға байланысты елеулі өзгерістерге ұшырайды. Көптеген жағдайларда бұл өзгерістер теріс сипатта болады, мысалы су және жел эрозиясының дамуы, суару кезінде екінші ретті тұздандудың пайда болуы, гумус мөлшерінің азаюы және жалпы топырақтың құнарлылығының төмендеуі.

1-кесте – Топырақ құрамы арқылы К коэффициентін есептеу

Топырақ бірлігінің белгісі	Үстіңгі қабаттағы құм, %	Үстіңгі қабаттағы лай, %	Үстіңгі қабаттағы саз, %	Үстіңгі қабаттағы органикалық заттар, %	F Топырақ текстурасы	F Топырақ құрылымы	F органикалық зат	F су өткізгіштік қасиеті	K фактор
СК	41,6	26,6	31,8	1,32	0,20	0,78	0,75	0,9998	0,118
КН	54,5	27,3	18,2	2,16	0,20	0,85	0,75	0,9976	0,128

LS-факторды анықтау үшін жердің сандық моделі Aster DEM бойынша әрбір сегменттің ұзындығы мен еңісі RUSLE әдісімен ArcGIS бағдарламасы арқылы есептелді. LS-факторы су жинау алабының бағытталуы мен шоғырлануына, жер бедерінің морфологиясына байланысты өзгеріп отырады. Зерттеліп отырған аймақта LS факторының көрсеткіші 0-ден 10 дейін топырақ эрозиясы қаупі өте төмен, 10-45 дейін эрозия қаупі орташа, мұндай учаскелерде агротехникалық шаралар қолдануды қажет етеді, 45 жоғары таулы жерлер, өзен аңғарлары, мұндай мәндер DEM қатесін немесе экстремалды рельефті көрсетеді. LS-факторының стандартты ауытқуы кейбір жерлерде жоғары мәнге жетеді, бұл зерттеліп отырған аймақтың топографиялық жағдайында айтарлықтай айырмашылықтардың бар екенін көрсетеді (4, 5-суреттер).



4-сурет – ArcGIS бағдарламасындағы Module Builder құрылғысы арқылы LS факторды анықтау

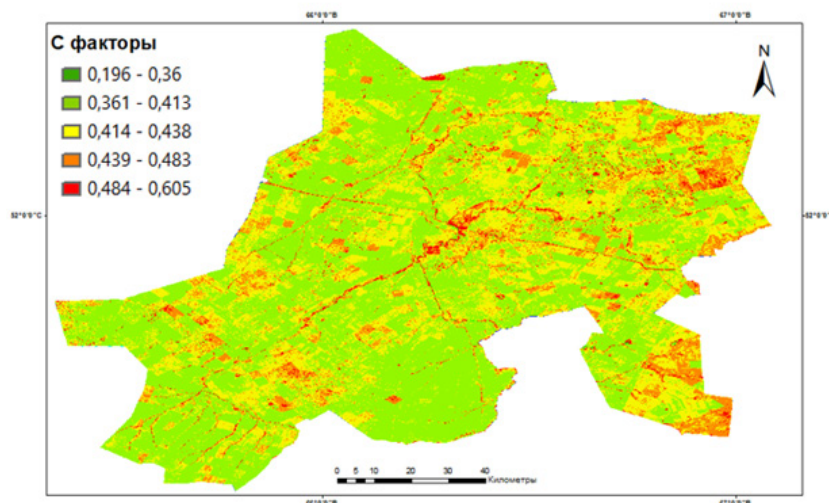


5-сурет – Ақмола облысы Есіл ауданының аумағында LS факторының кеңістікте таралуы

С-фактор өсімдік жамылғысы – топырақ бөлшектерінің тұрақтылығы мен топырақ құнарлығын жоғалтуын азайтуға қолайлы әсерін білдіреді. Қарастырылып отырған аумақта С-фактордың 0,439–0,605 аралығындағы мәндері өсімдік жамылғысының сирек немесе әлсіз дамығанын көрсетеді, мұндай аймақтарда топырақ эрозиясына бейімділік жоғары. Ал 0,414–0,438 аралығындағы мәндер сирек немесе орташа өсімдік жамылғысымен сипатталады. Бұл учаскелердегі өсімдік жамылғысының орташа деңгейде болуы, әсіресе жаңбырлы маусымдарда

немесе су ағыны кезінде, топырақтың эрозияға ұшырауына ықпал етеді. Сондықтан мұндай аумақтарда топырақты қорғау шараларын қолдану және өсімдік жамылғысын қалпына келтіру маңызды.

С-фактор 0,196-0,413 аралығындағы мәндер (6-сурет) әдетте егістік алқаптарына тән және маусымға байланысты (күз және қыс) өсімдік жамылғысының өзгеруі барысында топырақтың шайылу қауіпі туындайды (6-сурет). Сондықтан, топырақ эрозиясына сезімталдық бір маусымнан екінші маусымға өзгешеленеді. Мысалы, күзгі және қысқы маусымдарда өсімдік жамылғысының азаюы топырақтың эрозияға ұшырауына әкелуі мүмкін, ал жаз айларында өсімдіктердің жақсы өсуі топырақты қорғауға көмектеседі. Бұл эрозияны болдырмау стратегияларын әзірлеу кезінде маусымдық өзгерістерді ескерудің маңыздылығын көрсетеді.



6-сурет – Ақмола облысы Есіл ауданының аумағында С-факторының таралуы

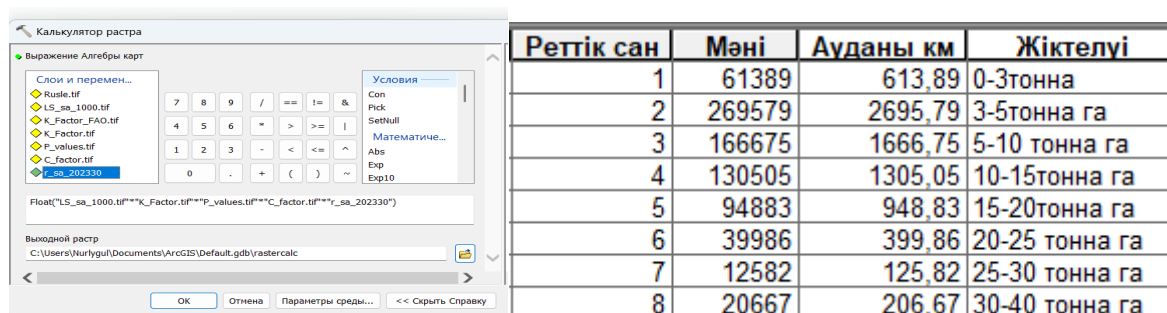
Есіл ауданының танаптары бойынша агротехникалық шаралар туралы деректер болмағандықтан, Landsat 8 спутнигінен [21] 03.06.2023 ж. планшеттерді дешифрлеу кезінде кейбір танаптарда бұталарды отырғызу, егістіктерді су ағындарына қарсы бағытта өңдеу жұмыстары жүргізілгені, кейбір танаптарында топырақ қорғау шаралары жүргізілмегені анықталып отыр (7-сурет). Жалпы ауданның басым бөлігін егістік жерлер қамтиды, осыған байланысты Р-фактордың орташа мәні ретінде 0,5 коэффициенті алынып отыр.



7-сурет – Ақмола облысы Есіл ауданы танаптары ғарыштық суретте

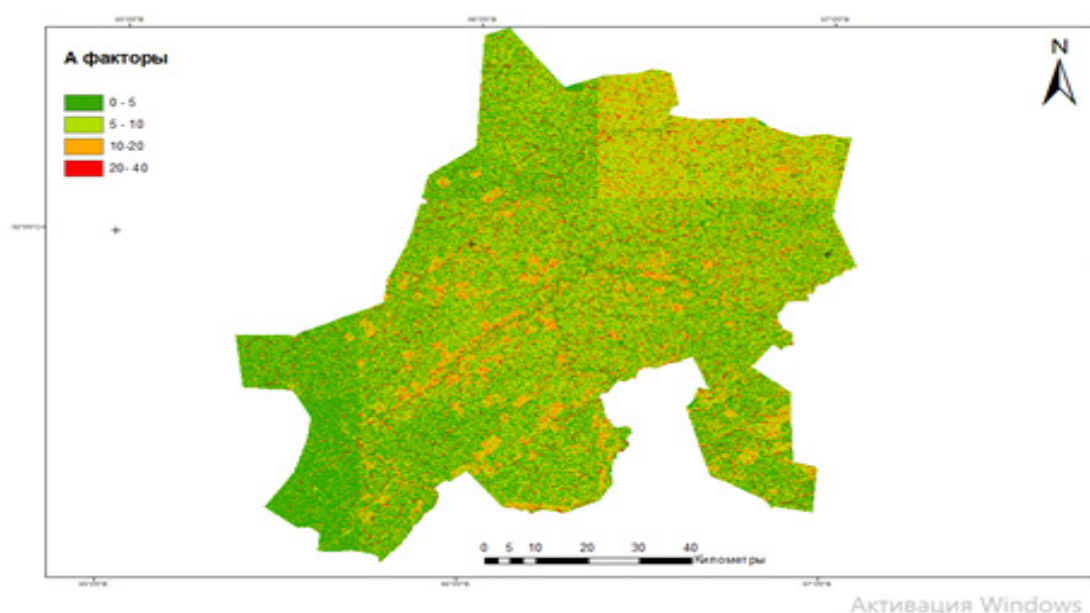
Есіл өзені алабындағы топырақтың құнарлығын жоғалтуын көрсететін карта RUSLE үлгісінің бес негізгі факторын талдау және көбейту ArcGIS бағдарламасы арқылы жасалды. Ол үшін R, K, LS, C және P параметрлеріне сәйкес келетін жеке қабаттар дайындалып, олар ArcGIS 10.4.1 бағдарламасында модельдеу құралдары арқылы біріктірілді. Эрозияның қарқындылығы тордың әрбір пикселі үшін есептелді.

Тематикалық карта деректері бойынша, топырақтың құнарлығын жоғалтуының мөлшері 0-ден 40 т га⁻¹ жыл⁻¹ аралығында өзгеріп отырады. Орташа көрсеткіш жылына 3,2 т/га құрайды, ал орташа квадраттық қателік коэффициенті 1,06 болды. Ең жоғары топырақтың құнарлығын жоғалтуы жылына 20-40 т/га, мұндай құнарлы қабаттың жойылуы өсімдік жамылғысы сирек аймақтарда, ауыл шаруашылығы және құрылыс алаңдарында, сонымен қатар жер бедері тік беткейлі телімдерде байқалды (8-сурет). Бұл аудандар эрозияға бейім және жоғары дәрежеде шайылу процесіне ұшырайды.



8-сурет – Растр калькуляторы арқылы А-факторды есептеу және атрибут кестесінде толтырылуы

Талдау барысында эрозия қарқындылығы 4 класқа бөлінді. Есіл алабының шамамен 90,7% әлсіз және орташа эрозияланған аймаққа жатады, онда топырақ шайылуы 20 т га⁻¹ жыл⁻¹ аспайды. Алаптың 9,3% аумағы топырақтың шайылу қарқындылығы көрсеткіштері 20-40 т га⁻¹ жыл⁻¹, бұл топырақтың эрозияға шалдығу деңгейінің орташа және жоғары дәрежедегі осалдығын көрсетеді (9-сурет).



9-сурет – Ақмола облысы Есіл ауданының эрозияға ықтимал картасы

Қорытынды

Зерттеулер нәтижесі бойынша RUSLE моделдеу тәсілін Ақмола облысы Есіл ауданының су жинайтын алабы аумағында топырақ эрозиясының кеңістіктік таралуын егжей-тегжейлі бағалау үшін сәтті қолдануға болатындығын көрсетті. Бұл әдіс аймақтағы эрозиялық процестерге әсер ететін негізгі факторларды анықтауға мүмкіндік берді. Алайда, модельдеудің дәлдігі ауданның топырақ туралы деректердің жетіспеушілігіне байланысты шектеулі болып отыр. Осыған байланысты модель нәтижелерін тексеру қиындау, сондықтан бағалаудың негізгі әдісі ретінде модельдің сәйкестігін талдау қолданылады, бұл топырақ эрозиясы саласында болашақ зерттеулер үшін пайдалы болатынына дәлел.

Аудандағы топырақтың құнарлы қабатының жоғалуы $3,2 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$ деңгейінде бағаланды, бұл эрозияның $3,1\text{--}10 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$ екінші санаттағы төмен шекке сәйкес. Зерттеу объектісінің аумағында топырақтың құнарлы қабатының шайылуы 0-ден $40 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$ дейін өзгереді, ал аумақтың көп бөлігі (шамамен 90,7%) 0-ден $20 \text{ т га}^{-1} \text{ жыл}^{-1}$ дейінгі төмен немесе орташа топырақ шайылу деңгейімен сипатталады. Топырақтың құнарлы қабатының шайылуының жоғары деңгейі аумақтың 9,3% байқалады, негізінен ауданның солтүстік-шығыс және оңтүстік бөліктерінде, онда топографиялық жағдайлар эрозиялық процестердің күшеюіне ықпал етеді. Осылайша, Есіл ауданының төмен немесе орташа эрозия тәуекелі бар аймақтарға жатқызуға болады. Дегенмен, маусымға және жылға байланысты айтарлықтай өзгеруі мүмкін, өсімдік жамылғысы су эрозиясының таралуына әсер етеді. Бағалау дәлдігін арттыру үшін өсімдік жамылғысы туралы маусымдық деректерді пайдалану ұсынылады, бұл топырақтың құнарлы қабатын жоғалту динамикасын жақсырақ зерттеуге және оны болдырмау шараларын бейімдеуге мүмкіндік береді.

Ақмола облысы Есіл ауданындағы Есіл өзенінің және оның салаларының жағалауында орналасқан егістікке жарамды жерлер мен жайылымдардың көпшілігі топырақты қорғау бойынша тиімді шараларды енгізуді талап етеді. Атап айтқанда, әсіресе ауданның деградацияланған аумақтарында өсімдік жамылғысын қалпына келтіруді күшейту қажет. Эрозиялық процестерді тұрақтандыру үшін аз өнімді жерлерде дұрыс ауыспалы егістер егу, танаптарды контурлы өңдеу, беткейлерді террассалау, қар тоқтату және қорғаныс орман белдеулерін құру сияқты тұрақты жер пайдалану әдістерін енгізу ұсынылады.

Авторлардың қосқан үлесі

НУ: зерттеудің тұжырымдамасын жасады және жобалады, жан-жақты әдебиеттерді іздестірді, жиналған деректерді геоақпараттық жүйе технологияларын пайдала отырып өңдеді. СК: теориялық мәліметтерді, алынған нәтижелерді тексерді. ТЖ: мақаланың нақтылығына негіздеме берді, қорытынды жазды. ВТ: қолжазбаның соңғы редакциясын және коррекциясын орындады. Барлық авторлар қолжазбаның соңғы редакциясын оқып, қарап, бекітті.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеулер 8D07304 Жерге орналастыру БББ докторанты Н.К. Унышеваның «Солтүстік Қазақстанның егістікке жарамды жерлерін пайдалану тиімділігін арттыру» диссертация тақырыбы бойынша жүргізілген бастамалық зерттеулер шеңберінде орындалды.

Әдебиеттер тізімі

1 Rahman, MR, Shi, ZH, Chongfa, C. (2009). Soil erosion hazard evaluation-An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecol. Model*, 220, 1724-1734. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.04.004.

2 Borrelli, P., Robinson, DA, Panagos, P., Lugato, E., Yang, JE, Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proc. Natl. Acad. Sci*, 117, 21994-22001. DOI: 10.1073/pnas.2001403117.

- 3 Hao, Z., Yuhui, C., Xiwang, Z., Shiqi, Yu, Mengwei, C., Chengqiang, Z. (2024). A Probabilistic Statistical Risk Assessment Method for Soil Erosion Using Remote Sensing Data: A Case Study of the Dali River Basin. *Remote sensing*, 16(18), 3491. DOI:10.3390/rs16183491.
- 4 Chalise, D., Kumar, L., Kristiansen, P. (2019). Land Degradation by Soil Erosion in Nepal. A Review. *Soil Syst*, 3, 12. DOI:10.3390/soilsystems3010012.
- 5 Guerra, AJT, Fullen, MA, Jorge, MCO, Bezerra, JFR, Shokr, MS. (2017). Slope processes, mass movement and soil erosion. *Pedosphere*, 27, 27-41. DOI:10.1016/S1002-0160(17)60294-7.
- 6 Le Roux, JJ, Sumner, PD. (2012). Factors controlling gully development: Comparing continuous and discontinuous gullies. *Land Degrad*, 23, 440-449. DOI:10.1002/ldr.1083.
- 7 Wen, B., Huang, C., Zhou, C., Zhang, H., Yang, Q., Li, M. (2023). Spatiotemporal dynamics and driving factors of soil erosion in the Beiluo River Basin, Loess Plateau, China. *Ecol. Indic*, 155, 110976. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110976.
- 8 Сводный аналитический отчет. О состоянии и использовании земель Республики Казахстан (2023). Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан, 148. https://www.gov.kz/memleket/entities/land/documents/details/667055?lang=ru&utm_source=chatgpt.com
- 9 Houssam, AO, Mohamed, YK, Mohammed, M., Lahouari, B., Ahmed, K. (2020). Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. *Scientific African*, 10, e00646. DOI:10.1016/j.sciaf.2020.e00646.
- 10 Zhou, W., Wu, B. (2008). Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: A case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *Int. J. Sediment Res*, 23, 167-173. DOI:10.1002/ldr.1083.
- 11 Zhiyuan, T., Yan, Z., Longxi, C., Yuan, Z., Yin, L. (2025). Assessing the declining trend in soil erodibility across China: A comparison of conventional and digital K-factor maps. *International Soil and Water Conservation Research*, 13, 15-26. DOI:10.1016/j.iswcr.2024.05.005.
- 12 Ebron, JG, Lim, TA. (2024). Siltation Modeling in Laguna Lake: A Case Study of Brgy. Palingon, Calamba City. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*, 1-6. DOI: 10.1109/ICTKE62841.2024.10787196.
- 13 Татаринцев, ВЛ, Инкаров, ДС, Макенова, СК, Унышева, НК. (2023). Экологическая оценка аграрного землепользования с применением геоинформационная система-технологий. *Вестник науки Казахского агротехнического университета имени С.Сейфуллина (междисциплинарный)*, 2, 22-31. DOI:10.51452/kazatu.2023.2.(117).1380.
- 14 Marondedze, AK, Brigitta, S. (2020). Assessment of Soil Erosion Using the RUSLE Model for the Epworth District of the Harare Metropolitan Province, Zimbabwe. *Sustainability*, 12(20), 8531. DOI:10.3390/su12208531.
- 15 Shamshad, A., Azhari, MN, Isa, MH, Wan Hussin, WMA, Parida, BP. (2008). Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. *Catena*, 72, 423-432. DOI:10.1016/j.catena.2007.08.002.
- 16 Yuan, S., Xu, Q., Zhao, K., Zhou, Q., Wang, X., Zhang, X., Chen, W., Ji X. (2024). Dynamic analyses of soil erosion and improved potential combining topography and socio-economic factors on the Loess Plateau. *Ecol. Indic*, 160, 111814. DOI:10.1016/j.ecolind.2024.111814.
- 17 Alaa, M., Atiaa, Al-A, Hussein, BG, Al- Qurnawi, WS. (2016). Estimation of soil erosion in northern Kirkuk Governorate, Iraq using RUSLE, remote sensing and GIS. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 153-166.
- 18 Асанова, ГА, Мерзляков, ОЭ, Татаринцев, ВЛ, Унышева, НК. (2023). Анализ устойчивости агроландшафтов в лесостепной зоне Красноярского края и мероприятия по их охране. *Устойчивое развитие горных территорий*, 15, 264-274. DOI: 10.21177/1998- 4502-2023-15-2-264-274.
- 19 Озеранская, НЛ, Карбозов, ТЕ. (2023). Основы ландшафтоведения: учебное пособие. КАТУ им С.Сейфуллина, 92.
- 20 Hamza, I., Rachid, M., Bouamar, B., Rachid, M., Ahmed D., Derradji, A. (2016). Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province -Northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 4, 159-167. DOI: 10.1016/j.iswcr.2016.07.001.
- 21 An official website of the United States government. (2021). USGS Science for a changing world. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

References

- 1 Rahman, MR, Shi, ZH, Chongfa, C. (2009). Soil erosion hazard evaluation-An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecol. Model*, 220, 1724-1734. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.04.004.
- 2 Borrelli, P., Robinson, DA, Panagos, P., Lugato, E., Yang, JE, Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proc. Natl. Acad. Sci*, 117, 21994-22001. DOI:10.1073/pnas.2001403117.
- 3 Hao, Z., Yuhui, C., Xiwang, Z., Shiqi, Yu., Mengwei, C., Chengqiang, Z. (2024). A Probabilistic Statistical Risk Assessment Method for Soil Erosion Using Remote Sensing Data: A Case Study of the Dali River Basin. *Remote sensing*, 16(18), 3491. DOI:10.3390/rs16183491.
- 4 Chalise, D., Kumar, L., Kristiansen, P. (2019). Land Degradation by Soil Erosion in Nepal. A Review. *Soil Syst*, 3, 12. DOI:10.3390/soilsystems3010012.
- 5 Guerra, AJT, Fullen, MA, Jorge, MCO, Bezerra, JFR, Shokr, MS. (2017). Slope processes, mass movement and soil erosion. *Pedosphere*, 27, 27-41. DOI:10.1016/S1002-0160(17)60294-7.
- 6 Le Roux, JJ, Sumner, PD. (2012). Factors controlling gully development: Comparing continuous and discontinuous gullies. *Land Degrad*, 23, 440-449. DOI:10.1002/ldr.1083.
- 7 Wen, B., Huang, C., Zhou, C., Zhang, H., Yang, Q., Li, M. (2023). Spatiotemporal dynamics and driving factors of soil erosion in the Beiluo River Basin, Loess Plateau, China. *Ecol. Indic*, 155, 110976. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110976.
- 8 *Svodnyi analiticheskii otchet. O sostoyanii i ispol'zovanii zemel' Respubliki Kazakhstan*. (2023). Ministerstvo sel'skogo hozyaistva Respubliki Kazakhstan, 148. https://www.gov.kz/memleket/entities/land/documents/details/667055?lang=ru&utm_source=chatgpt.com
- 9 Houssam, AO, Mohamed, YK, Mohammed, M., Lahouari, B., Ahmed, K. (2020). Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. *Scientific African*, 10, e00646. DOI:10.1016/j.sciaf.2020.e00646.
- 10 Zhou, W., Wu, B. (2008). Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: A case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *Int. J. Sediment Res*, 23, 167-173. DOI:10.1002/ldr.1083.
- 11 Zhiyuan, T., Yan, Z., Longxi, C., Yuan, Z., Yin, L. (2025). Assessing the declining trend in soil erodibility across China: A comparison of conventional and digital K-factor maps. *International Soil and Water Conservation Research*, 13, 15-26. DOI:10.1016/j.iswcr.2024.05.005.
- 12 Ebron, JG, Lim, TA. (2024). Siltation Modeling in Laguna Lake: A Case Study of Brgy. Palington, Calamba City. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*, 1-6. DOI: 10.1109/ICTKE62841.2024.10787196.
- 13 Tatarincev, VL, Inkarov, DS, Makenova, SK, Unysheva, NK. (2023). Ekologicheskaya ocenka agrarnogo zemlepol'zovaniya s primeneniem geoinformacionnaya sistema-tehnologii. *Vestnik nauki Kazahskogo agrotekhnicheskogo universiteta imeni S.Seifullina (mezhdisciplinarnyi)*, 2, 22-31. DOI:10.51452/kazatu.2023.2.(117).1380.
- 14 Marondedze, AK, Brigitta, S. (2020). Assessment of Soil Erosion Using the RUSLE Model for the Epworth District of the Harare Metropolitan Province, Zimbabwe. *Sustainability*, 12(20), 8531. DOI:10.3390/su12208531.
- 15 Shamshad, A., Azhari, MN, Isa, MH, Wan Hussin, MAW, Parida, BP. (2008). Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. *Catena*, 72, 423-432. DOI: 10.1016/j.catena.2007.08.002.
- 16 Yuan, S., Xu, Q., Zhao, K., Zhou, Q., Wang, X., Zhang, X., Chen, W., Ji, X. (2024). Dynamic analyses of soil erosion and improved potential combining topography and socio-economic factors on the Loess Plateau. *Ecol. Indic*, 160, 111814. DOI:10.1016/j.ecolind.2024.111814.
- 17 Alaa, M., Atiaa, Al-A, Hussein, BG, Al- Qurnawi, WS. (2016). Estimation of soil erosion in northern Kirkuk Governorate, Iraq using RUSLE, remote sensing and GIS. *Carpathian. Journal of Earth and Environmental Sciences*, 153-166.
- 18 Asanova, GA, Merzlyakov, OE, Tatarincev, VL, Unysheva, NK. (2023). Analiz ustoichivosti agrolandshaftov v lesostepnoi zone Krasnoyarskogo kraya i meropriyatiya po ih ohrane. *Ustoichivoe razvitie gornyh territorii*, 15, 264-274. DOI: 10.21177/1998- 4502-2023-15-2-264-274.

19 Ozeranskaya, NL, Karbozov, TE. (2023). *Osnovy landshaftovedeniya: uchebnoe posobie*. KATU im S.Seifullina, 92.

20 Hamza, I., Rachid, M., Bouamar, B., Rachid, M., Ahmed, D., Derradji, A. (2016). Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province –Northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 4, 159-167. DOI:10.1016/j.iswcr.2016.07.001.

21 *An official website of the United States government*. (2021). USGS Science for a changing world. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Оценка эрозии почвы с использованием технологии ГАЗ и модели RUSLE

Унышева Н.К., Макенова С.К., Жагипарова Т.Т., Татаринцев В.Л.

Аннотация

Предпосылки и цель. В настоящее время эрозия почв наносит значительный ущерб окружающей среде. В сельском хозяйстве эрозия почвы (ветровая и водная) и антропогенная деятельность приводят к деградации почв, способствуя разрушению плодородного слоя. В этой связи, цель исследования - изучить состояние земель, подверженных водной эрозии, в Есильском районе Акмолинской области на основе интеграции геоинформационных систем (ГИС) и модели RUSLE.

Материалы и методы. В процессе анализа были рассмотрены следующие показатели и коэффициенты: R - количество осадков; K - коэффициент устойчивости почвы к эрозии; LS - коэффициент, характеризующий длину и крутизну склона; C - фактор землепользования и почвенного покрова; P - меры по борьбе с эрозией и другие показатели.

Результаты. По результатам анализа было установлено, что потеря плодородного слоя почвы в районе находится на среднем уровне ($3,2 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$). На всей территории исследования ежегодно наблюдается низкий или средний уровень смыва плодородного слоя почвы (в диапазоне $0\text{--}20 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$) в 90,7% случаев, а максимальная потеря плодородия почвы достигает 9,3% (до $40 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$).

Заключение. Предложенный метод оценки эрозии позволяет полностью понять процессы пространственного распространения почвенной эрозии, лучше выявить будущее формирование почвенной эрозии по сравнению с традиционным методом оценки, а также способствует эффективному использованию для устойчивого управления почвами.

Ключевые слова: эрозия почвы; модель RUSLE; ГИС; цифровая модель рельефа; плодородный слой.

Assessment of soil erosion using GIS technology and the RUSLE model

Nurlygul K. Unysheva, Saule K. Makenova, Tolkin T. Zhagiparova,
Vladimir L. Tatarintsev

Abstract

Background and Aim. Soil erosion currently causes significant damage to the environment. In agriculture, soil erosion (both wind and water) and anthropogenic activities lead to soil degradation by contributing to the destruction of the fertile topsoil layer. The aim of this study is to examine the condition of lands affected by water erosion in the Esil district of the Akmola region, based on the integration of geographic information systems (GIS) and the RUSLE model.

Materials and Methods. During the analysis, the following indicators and coefficients were considered: R – rainfall erosivity; K - soil erodibility factor; LS - slope length and steepness factor; C - land cover and management factor; P - erosion control practices, along with other relevant indicators.

Results. The analysis results indicated that the loss of the fertile soil layer in the area is at a moderate level ($3.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). Across the entire study area, a low to moderate level of fertile soil layer washout (in the range of $0\text{--}20 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) is observed annually in 90.7% of cases, while the maximum soil loss reaches 9.3% (up to $40 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$).

Conclusion. The proposed erosion assessment method provides a comprehensive understanding of the spatial distribution of soil erosion processes. It more effectively identifies areas with potential for future erosion compared to traditional assessment methods, and supports the implementation of sustainable soil management practices.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; digital elevation model; fertile topsoil.