

ӘОЖ 551.4.02+551.4.04

Геогр. ғылымд. канд.
PhDЕ.Е. Халыков^{1,2}
Ю.Ф. Лый³
Е.Х. Какимжанов⁴
М.М. Макимбаева³
Ж.М. Шарапханова³**ЖЫРАЛЫҚ ЭРОЗИЯНЫҢ ДАМУЫН ЖЕРҮСТІ ЛАЗЕРЛІК
СКАНЕРЛЕУ ӘДІСІМЕН ЗЕРТТЕУ**

Түйін сөздер: жыралық эрозия, жыралар, жерүсті лазерлік сканерлеу, ғарыштық түсірілімдер, Мұқыр өзені, Жетісу Алатауы

Қазіргі уақытта жер бедері мен басқа да объектілерді зерттеуде тез дамып келе жатқан әдістердің бірі жерүсті лазерлік сканерлеу әдісі (ЖЛС) болып табылады. Жерүсті лазерлік сканерлеу әдісінің тиімділігіне үлкен зерттеу аумақтарын қысқа мерзімде көптеген ақпарат жинап жылдар бойы мониторинг жүргізуін жатқызуға болады. Жерүсті лазерлік сканерлеуді қолдану жаратылыстану ғылымдарында және табиғатты зерттеуде, әсіресе Батыс Еуропада, АҚШ-та және басқа дамыған елдерде белсенді дамып келеді.

Мақалада жыраларда жүргізілген ЖЛС әдісінің негізгі кезеңдері және олардың қалай іске асырылғаны сипатталады. Жыраның егжей-тегжейлі сандық үлгісін алу үшін жоғары дәлдікті 3D RIEGL VZ-4000 лазерлік сканері, алынған деректерді өңдеу үшін RiscanPro бағдарламасы пайдаланылды.

2017...2019 жж. күз мезгілінде Мұқыр өзені аңғарындағы (Алматы облысы, Көксу ауданы) жыралық эрозияға ЖЛС әдісімен және ғарыштық түсірілімдерді пайдаланып зерттеулер жүргізілді. Бұл аңғардағы жыралардың басым бөлігі негізінен флювиалдық үдерістердің ықпалынан бастапқы және терең бөліктерінің өсуі байқалатын дамушы жыралар болып табылады.

¹Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан

²Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан

³«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Мақала ЖЛС әдістерінің далалық және камералдық зерттеулерінің нәтижелерінен тұрады. Жыралық эрозияның дамуына ықпал ететін факторлар көрсетіліп, заманауи құралдар мен ғарыштық түсірілімдердің негізінде алынған жыралардың морфометриялық сипаттамалары берілген.

Осы аймақтағы жыралық эрозияны экологиялық қауіпсіз мақсаттағы табиғи ортаға рұқсат етілген жүктемелерді жоспарлау қажеттілігімен анықталады. Жыралық эрозия қазіргі уақытта эрозияға ұшыраған жерлердің ауданы ұлғайып, салдарынан олардың өнімділігі төмендеп жатқан тау бөктеріндегі және жазықтық аудандарда едәуір қауіпті. Жыралық эрозияның пайда болу нәтижесінде тек экологиялық (құнарлылығын жоғалту) қана емес, сонымен қатар экономикалық залал (ауыл шаруашылығы өндірісі тиімділігінің төмендеуі) туындайды.

Кіріспе. Жыралар түзілімі тау жыныстарының еріген және жаңбырлы сулардың уақытша ағындарымен жер үсті шайылуына байланысты қалыптасқан күрделі бедер түзуші үдеріс болып табылады. Жыралар өзен аңғарларының, сайлардың, құрғақ аңғарлардың баурайларында табиғи жағдайларда, қала маңындағы аймақтарда, кенттер маңында өсімдіктердің деградациялануы кезінде, сондай-ақ пайдалы қазбаларды өндіру және құрылыс кезінде жерді шаруашылық пайдалану нәтижесінде пайда болады.

Жыралар Қазақстанның оңтүстік-шығысында орналасқан Жетісу Алатауының таулары мен тау бөктеріндегі бедердің кең тараған деструктивті формаларының бірі болып табылады. Бұл аумақтар қолайлы табиғи жағдайларына байланысты мыңжылдықтар бойы адамның шаруашылық жүргізген орны болып табылады. Жер бедеріне антропогендік жүктемені күшейту жыралық эрозияның қалыптасуына ықпал етеді, әсіресе Мұқыр өзенінің аңғарында ғарыш түсірілімдерін пайдалану арқылы өзгерулердің белсенді дамуы анықталды. Анықталған белсенді жыраларға олардың дамуының әртүрлі кезеңдерін тіркеу үшін репер нүктелерін қолданып жартылай стационарлық бақылау жүргізілді. Сонымен қатар 2017...2018 жж. күз мезгілінде Мұқыр өзені аңғарындағы (Алматы облысы, Көксу ауданы) жыралық эрозияға ЖЛС әдісімен зерттеулер жүргізілді.

Мұқыр өзенінің бастауы Жетісу Алатауының батыс бөлігінде Шаған тауларында (2551 м) орналасқан, Қаратал өзенінің алабындағы

Быжы өзеніне құяды. Мұқыр өзенінің суы жеміс-жидек, жемшөп және дәнді дақылдар өсірілетін фермерлік шаруашылықтар мен бақтардың алқаптарын суару үшін пайдаланылады.

Алдымен Мұқыр өзенінің аңғарындағы жыралардың дамуын бақылау үшін ғарыштық түсірілімдерді пайдаланып, өзгеріске ұшыраған жыралар анықталды, содан кейін ЖЛС әдісін қолданып жыралардың шайылу көлемі есептелді.

ЖЛС – сканерден объектінің нүктелеріне дейінгі қашықтықты жоғары жылдамдықпен өлшеу және тиісті бағыттарды тіркеу. ЖЛС-ді іске асыру кезінде объектіні толық түсіру принципі қолданылады, бірақ оның жеке нүктелері мен бөлшектерін емес, осының нәтижесінде – объектінің үш өлшемді суреті жасалынады. Олар скан деп аталады. ЖЛС технологиялары алғашында геодезияда пайда болды және бұл олардың қолданылуына байланысты: топографиялық түсіру, құрлыс, күрделі инженерлік құрылымдарды сканерлеу және т.б. Табиғи ортаны зерттеулерде ЖЛС технологиясын қолданылған негізгі салалық бағыттар келесілер: гидрологиялық зерттеулер [12]; жер жамылғысы [5]; гляциология [4]; жер сілкіністерін зерттеу [6]; жағалау аймақтарына мониторинг жүргізу [9, 10]; сырғыма процестерін зерттеу және бақылау [2, 11]; геологиялық зерттеулер [14].

Авторларының жұмыстарында[3] ЖЛС әдісін қолдану арқылы Миннесота штатының (АҚШ) солтүстік бөлігіндегі сулы-батпақты алқаптардың микро топографиялық өзгергіштігі зерттелген. Олар сулы-батпақты алқаптардың микро топографиялық құрылымын сандық анықтаудың жаңа әдісін ұсынған және шамамен 1 см ұсақ бөлшектері бар бедердің сандық үлгісін (БСУ) құрастырған. Нәтижесінде 1 см жоғары ажыратымдылығы бар ең дәл микро топографиялық беттің үлгісі алынды (ығысу = $1,26 \pm 0,1$ см). Зерттеу нәтижелері 1...10 см жоғары рұқсат етілген жоғарғы қабаттың үлгілері (сулы-батпақты алқаптар) тік және көлденең микро топографиялық құрылымды дәл түсіріп алу үшін қажет екенін көрсетті, және де үлгінің қателігі БСУ рұқсатын азайтумен ұлғаяды. Бұл әдісті қашықтан зондылаудың ұқсас платформаларына қолдануға болады [3].

Қазіргі уақытта ЖЛС әдісін қолдану арқылы жыралық эрозия үдерістерін зерттеу жұмыстары жиі жүргізілуде. Қытайлық мамандар Лесс үстіртіндегі өзендер мен жыралардың ұзындығын және ауданының өзгеруін ЖЛС әдісімен бірге QuickBird жасанды жер серігінің түсірілім суреттеріне негізделген эрозияны бағалау моделін құрастырған. Қытайдың

солтүстігіндегі Шэньси провинциясындағы 44 аңғардың жағалауларының морфологиялық сипаттамалары 3-өлшемді сканердің көмегімен зерттелді. Аңғарлардың өткізгіш көлемі мен ұзындығы арасындағы қуат функциясының байланысы бұл аймақта жоғары эрозиялық қауіптілік барын көрсетті және айтарлықтай бір-бірімен байланысты екенін анықтады [16].

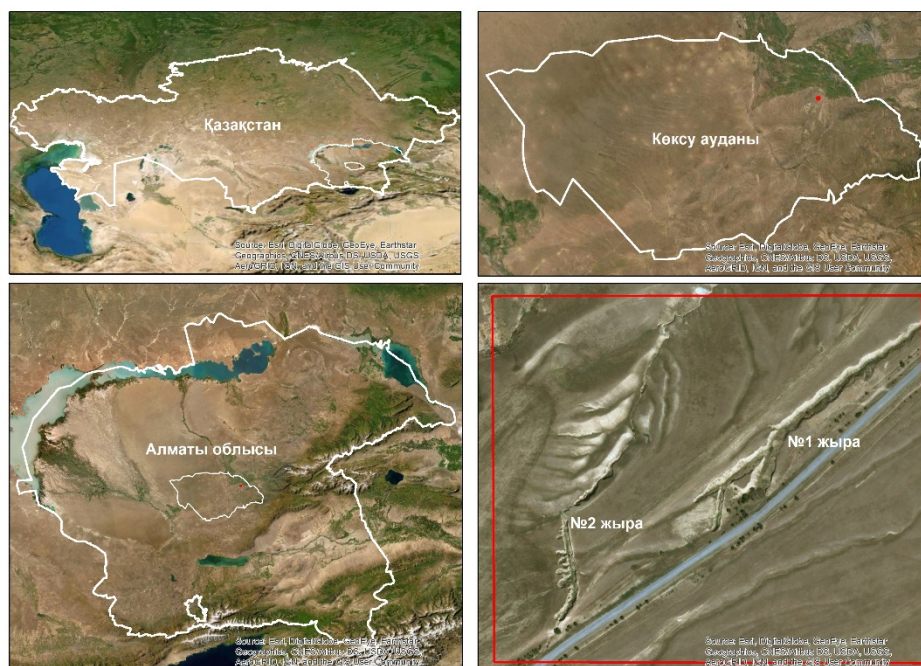
Әуедегі лазерлік сканерлеу (ӘЛС) және ЖЛС технологиялары жер бетінің топографиясын кеңістікте егжей-тегжейлі бағалауға мүмкіндік береді және көп уақытта жиналған сканерлеу мәліметтерінен геоморфологиялық өзгерісті бағалау үшін пайдалануға болады. Аустралияның солтүстік-шығысындағы Квинсленд штатындағы Аратула аумағындағы жыралық эрозияның дамуын 1 жыл ішінде ӘЛС және ЖЛС әдістерін қолдана отырып, қай әдістің дәлірек сандық мәлімет беретінін анықтады. Осы әдістерді қолдану нәтижесі бойынша ӘЛС әдісі жыралардың 10 м жоғарғы ұзындықтағы бірнеше жылдық үлкен өзгерістерді жақсы көрсетсе, ЖЛС әдісі ұсақ жыралардың жауын-шашын салдарынан бір жыл ішіндегі 0,45 м төмен өзгерістерін көрсете алды. ЖЛС жыл сайын жыралардың неғұрлым аз өзгерістерін анықтай алды, бірақ кеңістіктегі шектеулер бар. ЖЛС және ӘЛС зерттеулері бір-бірін толықтыратын қосымша технологиялар және бірге қолданылған кезде әртүрлі уақыттағы және кеңістіктік масштабтағы табиғи арықтар мен жыралардағы эрозиялық үдерістерді неғұрлым егжей-тегжейлі түсінуге мүмкіндік береді [8].

Зерттеу аумағы. Географиялық орналасуы бойынша бұл аумақ Жетісу Алатауының батыс сілемдері, аздап бөлінген орташа-ұсақ таулар (Жаңабай, Албасу, Жуантөбе таулары), теңіз деңгейінен 900 м-ден 1600 м-ге дейінгі абсолюттік биіктікте орналасқан. Бедер тегістелген көлбеу аңғарлар мен сайлар жүйесімен күрделенген, салыстырмалы биіктігі 200...250 м-ден аспайды (1-сурет).

Геоморфологиялық аудандастыру бойынша зерттеу аумағы Қазақстанның оңтүстік және оңтүстік-шығысындағы орогендік белдеу аймағына, үлкейтілген геоморфологиялық аймаққа – Жетісу Алатауының жоталары мен тау бөктеріне жатады [1]. Морфогенетикалық түріне сәйкес бұл денудация бетіне жиналған жинақтаушы бедер. Бұл көптеген таулы, көбінесе құрғақ шатқалдар мен солтүстік бағытта басым болатын уақытша ағындардың аңғарлары бар төбелі-бедерлі бедер.

Беті сұр-сары түсті, төрттен бірі саздақтармен, ірі малтатастармен және құмдармен құралған. Саздақтардың қуаты 2,55 м-ден 3,10 м-ге дейін

ауытқиды, орташа 2,87 м. Инженерлік-геологиялық жағдайлар мен бедер түзуші үдерістерге физикалық үгілу, жазықтық шайылу, бүйірлік эрозия, жыралық эрозия, орташа қарқынды жаңбырмен қоректенетін селдер, сел тасқындары, су ағындары (қатты ағынмен және кездейсоқ көрінісі), жартасты жыныстардағы шөгінділер, жартасты жыныстардағы опырылым, көшкіндер, қар көшкіндері жатады. Бұл үдерістер бір уақытта бедерді өзгертеді және заттың қайта орналасуына қатысады, яғни учаскенің қазіргі заманғы бедерін қалыптастыруға бір мезгілде денудация және шоғырландыру үдерістері қатысады.



Сур. 1. Жыраларға зерттеулер жүргізілген аудан.

Ауданның климаты континентальды, үлкен тәуліктік және жылдық ауа температурасының амплитудалары, орташа суық қыс және ұзақ ыстық жаз тән. Ауаның орташа жылдық температурасы $+6...9^{\circ}\text{C}$, жылдық жауын-шашынның орташа жылдық жиынтығы 380 мм. Жыра пайда болуының маңызды факторларының бірі гидрометеорологиялық жағдайлар болып табылады: жауын-шашын мөлшері, олардың қарқындылығы және уақыт бойынша бөлінуі. Жауын-шашын мөлшері мен жыралардың сызықтық өсуінің өзара байланысын анықтау үшін зерттеу кезеңіндегі атмосфералық жауын-шашынның жиынтық саны есепке алынды.

Зерттеудің өзектілігі. Осы аймақтағы жыралық эрозияны экологиялық қауіпсіз мақсаттағы табиғи ортаға рұқсат етілген

жүктемелерді жоспарлау қажеттілігімен анықталады. Жыралық эрозияның салдарынан қазіргі уақытта эрозияға ұшыраған жерлердің ауданы ұлғайып, олардың өнімділігі төмендеп, тау бөктеріндегі және жазықтық аудандарда қауіп туғызуда. Жыралық эрозия тек экологиялық (кұнарлылығын жоғалту) қана емес, сонымен қатар экономикалық залал (ауыл шаруашылығы өндірісі тиімділігінің төмендеуі) тудырады.

Зерттеу материалдары мен әдістері. Далалық-аспаптық әдістерімен жыраларды зерттеу учаскелерінде, жергілікті жердің егжей-тегжейлі сандық үлгісін алу үшін жоғары дәлдікті 3D RIEGL VZ-4000 лазерлік сканері қолдалынып нүктелік бұлттар жасалынды. Деректерді өңдеу үшін RiscanPro бағдарламасы қолдалынды. Картографиялық әдісті, геоақпараттық жүйелерді (ГАЗ), ArcGIS бағдарламасын пайдалана отырып, орта және жоғары шешімді ғарыштық түсірілімдерді дешифрлеу, салыстырмалы, жүйелік талдау және нәтижелерді сипаттау әдістері пайдаланылды.

ЖЛС әдісін қолдану эрозиялық үдерістерді зерттеу кезінде денудация және аккумуляция процесін сипаттай отырып, жергілікті жердің бедерінде өзгерістерді көрсететін жоғары дәлдікпен үш өлшемді деректерді жедел алуға мүмкіндік береді. ЖЛС әдісі эрозиялық үдерістердің, атап айтқанда шайылған топырақ көлемінің, көлденең және бойлық кескіндердің сызықтық өзгерісінің сандық сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік берді.

Қазіргі уақытта бедер ортасының өзгергіштігін бағалау, оның ішінде жыралы-сайлы жүйелердің өзгеруін анықтау үшін ЖЛС әдісін зерттеушілер тиімді қолдануда.

ЖЛС әдісі 3 негізгі кезеңнен тұрады: мониторингтік учаскелерді және сканерлеу нүктелерін таңдау; түсірілім жасалынатын нысанның сыртқы беткейін максималды 3D жерүсті лазерлік сканермен түсіру; RiSCAN PRO бағдарламасында алынған деректерді камералдық өңдеу. Лазерлік сканерлеу координаталық-өлшеу жүйелері объектінің нүктелерінің координаталарын оның геометриялық өлшемдерін анықтау мақсатында өлшеуге арналған.

Жыраның 3 өлшемді бедердің сандық үлгісін (БСҮ) алу үшін жоғары дәлдікті RIEGL VZ-4000 лазерлік сканері қолдалынды. RIEGL VZ-4000 – бұл жіңішке инфрақызыл лазерлік сәулені іске қосу және жылдам әрекет ететін сканерлеу механизмін пайдалана отырып, жұмыстың жоғары жылдамдығын, деректерді түйіспесіз жинауды қамтамасыз ететін үш өлшемді жерүсті лазерлік сканері. ЖЛС құралының әрекет ету принципі

кеңістіктегі нүктелердің координаталарын полярлық әдіспен өлшеу болып табылады. Қашықтықты өлшеу сигналды цифрлау технологиясы бар импульстік әдісті пайдаланатын лазерлік ара-қашықтықты өлшеуішпен жүргізіледі [13].

Далалық жағдайда ЖЛС үшін дайындық жұмыстары. Аспаппен ең қарқынды бедер түзуші үдерістерді барынша қамту және сканермен түсірілмеген беттерді (қара дақтар) азайту үшін Google Earth ресурстарында, ғарыштық түсірілімдер мен топографиялық карталар бойынша зерттелетін аумаққа алдын ала барлау жүргізіледі. Дайындалған карта-сызбаларда сканерлеу нүктелері (сканпозициялар) жазылады, бірақ жергілікті жерде немесе дұрыс емес картографиялық материалдар өзгерген жағдайда сканерлеу нүктелері учаскенің жағдайына байланысты далалық кезеңде түзетіледі.

Даладағы ЖЛС дайындық жұмыстары кезінде жыралы-сайлы жүйелерді сканерлеу үшін келесі өлшемдер анықталды: нысанға дейінгі ең аз арақашықтық (5 м); нысанға дейінгі ең үлкен арақашықтық (4000 м); шашыраңқы нысандарды (қабырғалар, бұталар мен ағаштар) бақылау, нысанның бетінде мәліметтердің толық жиынтығын алу; 60° тік вертикальді сканерлеу диапазоны; көлденең қадаммен сканерлеу 0,03° (Frame Res); 200 кHz жиілікті өлшеу бағдарламасы (1...2 км сканерлеу); сканпозициялардың қабаттасуы 10...15%; сканпозициялардасканердің нық тұру жерін анықтау.

Таңдалған аймақтарды RIEGL VZ-4000 сканерімен жер үсті лазерлік сканерлеу. Нысандарды сканерлеу, әдетте, зерттелетін табиғи нысанға қатысты сканердің әртүрлі нүктелерінен алынған бірнеше сканерлеу көмегімен жүзеге асырылады (сканерлеу позициялары, 2-сурет). Сканерді «Көрудің тікбұрышты өрісі» режимінде сканерлеуді орнату қажет. Әдетте құрылымдық және сызықтық сканерлер бірдей бұрыштық өсімге орнатылады, сондықтан алынған нүктелік бұлт бұрмаланбайды, бірақ екі осьте де тұрақты бұрыштық торға ие. Тіктөртбұрышты сканерлеу режимінде сканердің бастапқы бөлігінің айналуы, мәліметтерді жинауы және айналдырудың аяқталуы барлық көрініс өрісі сканерленгеннен кейін басталады [13].

Далалық кезеңде алынған деректерді RiSCAN PRO бағдарламасында камералық өңдеу жұмыстары. Қысқаша лазерлік сканерлеу деректерін өңдеу келесі құрам-бөліктерден тұрады:

– сканерлеу ұстанымын тіркеу және көп станцияны теңестіру (КСТ);

- біріккен нүктелік бұлт құру; «жаңғырықтан» тазарту; өсімдіктерден және табиғи емес объектілерден тазарту;
- әртүрлі кезеңдердегі нүктелік бұлтты салыстырмалы талдау;
- сандық биіктік үлгісін құру;
- 2 жыл байқау кезінде шайылған топырақ массасының көлемін есептеу.



Сур. 2. Лазерлік сканерлеу жүргізілген Мұқыр өзені аңғарындағы жыр.

Сканерлеу позициясы және КСТ. Сканерлеудің әртүрлі позицияларын жобаның координаталар жүйесінде тіркеу процесіне сәйкес матрица мен сканердің орналасуын анықтау болып табылады. Сканерлеудің бір позициясын жобаның координата жүйесінде тіркеу үшін сканердің меншікті координата жүйесінде байлау нүктелерінің тізімін алу керек. Кейін автоматты тіркеу функциясы бар RiSCAN PRO бағдарламасында барлық сканерлер тіркеледі. Деректерді жазудың бұл түрі пайдаланушының минималды немесе нөлдік араласуымен сканерлеу нүктелерін автоматты түрде тіркеуге мүмкіндік береді. RiSCAN PRO жақын нүктелер алгоритмінің итерациясын қолдана отырып, бірдей нүктелерді автоматты түрде анықтай алады. Бұл басқа нүктелік бұлттардан бірдей нүктелерді анықтау арқылы жүзеге асырылады.

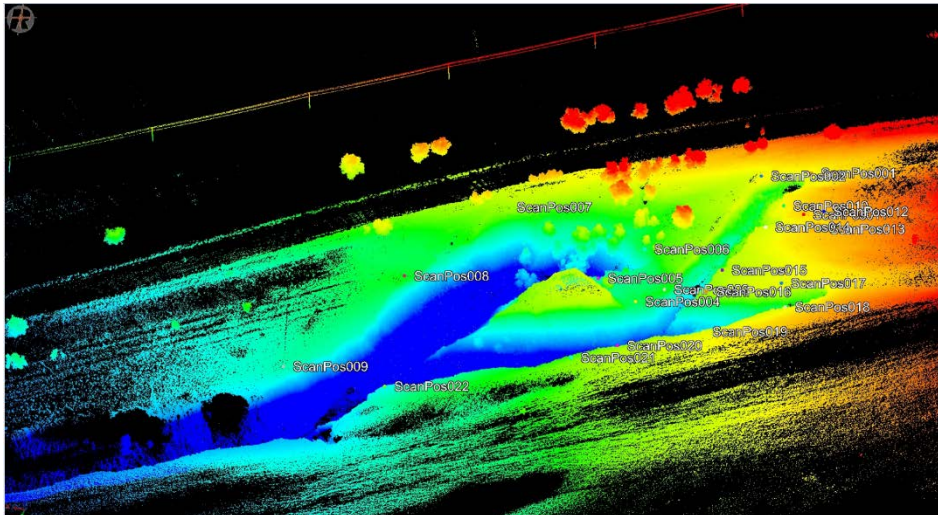
Автоматты тіркелу «Voxels» деп аталады. «Voxels» белгілі бір физикалық өлшемдегі текшелер түрінде метрмен көрсетіледі, үлкен ашық жерлерде сканерлеу үшін 4,0 м өлшемін таңдау керек. Автоматты тіркеу опциясын қолданғанда, біз бағдарлама опциясында қалалық орта емес ашық жер параметрін таңдаймыз. Бұл параметр ашық кеңістіктегі экзогеодинамикалық үдерістерді зерттеуге өте қолайлы.

Белгілі бір аудандарда қабаттасудың болмауы немесе әртүрлі сканерлерде сипаттамалық элементтердің болмауы себебінен «Автоматты тіркеу» әрқашан белгілі бір сканерлеулерді тіркеуді жүзеге асыра бермейді. Бұл жағдайда оператор қолмен көмек опциясын пайдаланады. Қолмен көмек параметрін қолдана отырып, сканерлеу күйлерін қолмен туралауға болады. Егер тіркеу сәтсіз болса, хабарлама әдетте тіркеуді тоқтату үшін тоқтайды және сізге 3D форматындағы бағдар мен орынды өзгерту ұсынылады. Сканерлеудің айналуы мен қозғалыс манипуляцияларынан кейін қолдану түймесін басу арқылы автоматты тіркеу процесі жалғасады. Бұл интегралда сканерлеу позициясын жоғары дәлдікпен орналастыру қажет емес, өйткені дұрыс емес тіркеу кезінде дұрыс орналасу үшін тарту әрекеті орындалады.

Автоматты тіркеу және бағдарлама жұмысына қолмен көмек көрсету опцияларын қолданғаннан кейін КСТ қолданылады. КСТ бірнеше жазылған сканерлеу орындарының арасындағы алшақтықты азайтуға арналған. Ол үшін сканерлеу ұстанымының бағыты мен орналасуы бірнеше итерация нәтижесінде өзгертіледі. Бұл процесті жеделдету үшін нүктелік бұлтты дайындау керек (қысқарту, жеңілдету, азайту). Сканерлеу позицияларын салыстыру үшін байланыс нүктелері, байланыс нысандары және полидата нысандары қолданылады. КСТ бастау үшін алдын-ала деректерді дайындау қажет. КСТ сканерлеу орнын теңестіру үшін сканерленген объектінің беткі (жазықтық) мәліметтерін пайдаланады. КСТ сканерлеу орнын өзгертіп, есептелген ұшақтар арасындағы қашықтықты азайтады. Бұл үшін тиісті беткі тегіс «патчтарды» (БТП) анықтау опциясы қолданылады. Бұл екі немесе одан да көп нүктелік бұлттарды тіркеу үшін қолданылады, нәтижесінде жазықтықты және бетінің қабаттасатын бөліктері анықталады. БТП опциясы нүкте бұлттындағы жазықтарды іздейді. Осы алгоритм – мүмкін болатын ең үлкен мөлшері бар БТП іздеу (мысалы, тегіс біртекті аумақтарда беттер үлкенірек және жиектеріне жақын болады). Сіз минимумнан максимумға дейін реттеу арқылы БТП минималды мөлшерін басқара аласыз.

КСТ бастамас бұрын, барлық қол жетімді сканерлеу ұстанымдарының тізімінен блоктау үшін сканерлеу орнын таңдау керек. Сканерлеудің әр ұстанымының жанындағы тілқатысу терезесінде орын (x, y, z) және бағдарлау (айналу, сырғу, ауытқу) көрсетіледі. Бұл опция әртүрлі сканерлеулерді теңестіру үшін қолданылады. Әдетте түзету үшін барлық басқа позицияларды қамтитын сканерлеу орны қолданылады. Сканерлеудің бір позициясының екіншісіне ауысуын әртүрлі түстер беріп, сканерлеу орны атауының алдына тексеру белгіні қою немесе өшіру арқылы анықтауға болады. Қажетті сканерлеу орнын анықтағаннан кейін ол бұғатталады және реттеу процесі басталады. Бұл параметр қате минимумға жеткенге дейін әр сканерлеу орны мен бағыты туралы ақпаратты өзгертеді. Ол үшін мәліметтер анықтамалық координата жүйелеріне байланыстырылуы керек. Егер сілтеме нүктелері болмаса, кем дегенде бір қарап шығу орнының орналасқан жері мен бағдарын бұғаттау керек. Түзетілген және бағдарланған мәліметтерді содан кейін жобалық бағдарламада сақтауға болады.

Біріккен нүктелік бұлт жасау. Тіркеу аяқталғаннан кейін және барлық сканерлеу ұстанымдарын теңеуден кейін біріккен нүктелік бұлт құру керек. Нүктелік бұлт – белгілі бір координаталар жүйесіндегі координаталық мәндері бар нүктелер тобы. Координаталардың мәнін анықтайтын жоғары дәлдіктегі құрылғының болмауына байланысты біз RiSCAN PRO бағдарламалық жобасының координаталар жүйесін қолдандық. Координаталардан басқа, нүктелік бұлттан шыққан әрбір нүкте маңызды қосымша атрибуттарды анықтауға мүмкіндік береді, мысалы, импульстік пішіннің қабілеті мен ауытқуын көрсететін уақыт белгісі, амплитудасы. Біріккен нүктелік бұлтты құру кезінде нүктелердің тығыздығын белгілі бір сантиметр арқылы (x, y, z координаталары бойынша) сиретеміз, біздің жағдайда 5, 10, 20 сантиметр арқылы сирету нүктелік бұлттың салмағын әрі қарай өңдеу және қорытынды сандық деректерді алу үшін жеңілдету үшін жүргізілді. 3-суретте автокөлік жолына жақын орналасқан Мұқыр өзенінің аңғарындағы жыраның лазерлік сканерлеу нәтижесінде құрылған біріккен нүктелік бұлтты көрсетілген. Бұл суреттегі нүктелік бұлтта жыраның өзі, жол бойындағы электр желісінің бағаналары және ағаштар анық көрінеді. RiSCAN PRO бағдарламасының жеке жобаларындағы әр бақылау алаңы үшін құрылған біріккен нүктелік бұлт сандық талдау үшін ыңғайлы монолитті мәліметтер материалы болып табылады.



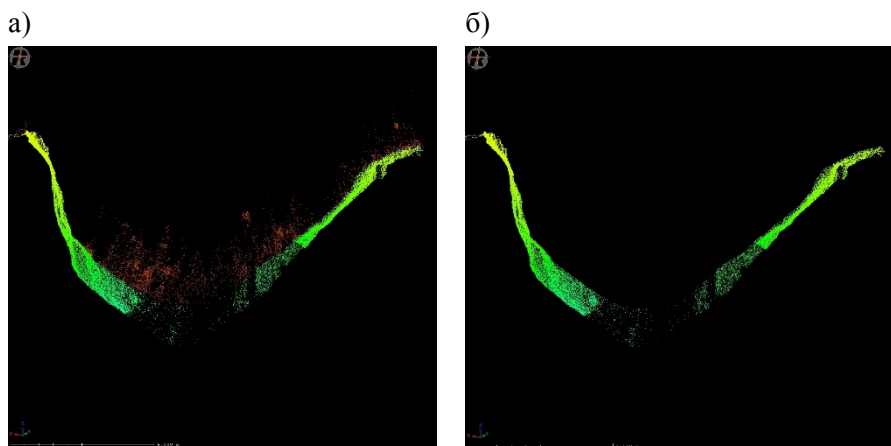
Сур. 3. Жыраның лазерлік сканерлеуден кейінгі жасалынған біріккен нүктелік бұлтты (көк түстен қызыл түске қарай нүктелердің биіктігі жоғарылайды).

«Жаңғырықтан» тазарту. Табиғи нысандарды пайдалы деректермен бірге сканерлеген кезде қосымша эхо-деректер (әртүрлі беттерден шағылысқан сигналдар) түседі. Бұл «жаңғырық» деректерін әрі қарай талдау үшін нүктелік бұлтты өңдеуде қажет емес ақпараттарды жасайды. Сондықтан мұндай «жаңғырық» деректерін жою қажет. Ол үшін құрылған біріккен нүкте бұлттында біз тек «жалғыз» және «соңғы жаңғырықты» қалдырып, «бірінші» және «басқа жаңғырықтарды» жоямыз. Осылайша, әрі қарай өңдеудің ең пайдалы нүктелері біріккен нүктелік бұлтта қалады.

Өсімдіктен және табиғи емес объектілерден тазарту. Ашық жерде сканерлеу кезінде сканер сандық биіктік моделін құру үшін қажет емес көптеген өсімдіктер мен табиғи емес объектілерден шағылысқан сигналдарды алады. Сондықтан бағдарламалық қамтамасыз етуді нүктелік бұлттан өңдеу кезінде, өсімдіктер фильтрінің опцияларын қолдана отырып, өсімдік жамылғысын алып тастаймыз (4-сурет). Табиғи емес нысандар бағдарламада қолмен жойылады, әр нысанды жеке-жеке кесіп тастайды. Өсімдіктер мен табиғи емес нысандарды тазалағаннан кейін, сандық бедерді салу туралы деректер ғана сақталады.

Әртүрлі кезеңдердегі нүктелік бұлтты салыстырмалы талдау. Нүктелік бұлтты әртүрлі кезеңдерге талдау үшін бағдарламалық жасақтамада бір жобадағы әртүрлі кезеңдерге біріккен нүктелік бұлт

шақыру қажет. Бағдарлама жобасында, оның ішінде ұяшық масштабындағы құрал, объектінің биіктігі, ені мен ұзындығының өзгеруі туралы сандық мәліметтерді алуға болады. Сонымен қатар, бір суретте әртүрлі кезеңдерге арналған жоспарлы көріністі, көлденең және бойлық кескіндерді алуға болады.



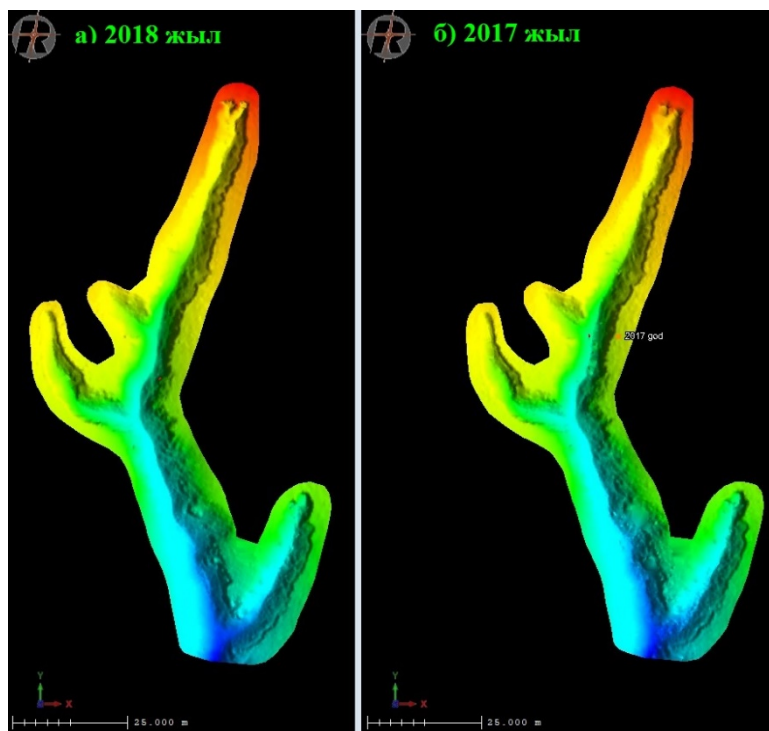
Сур. 4. Жыраның 3D моделіндегі өсімдік сигналдарынан тазалау: а – өсімдікпен, б – өсімдіктерден тазаланған соң (қызыл түсте өсімдіктер).

Бедердің сандық үлгісін құру. Болашақта БСУ құру үшін мәліметтер сүзгісін қолданып полидата құру қажет. Деректер сүзгісінде 2,5D растрлық режимін таңдап, біз полидата аламыз. Әрі қарай алынған полидата Делон триангуляциясы алгоритмі арқылы үшбұрышталады. Делон триангуляциясы тірек жазықтығына айналдырылған шыңдардың 2,5D координаталарынан есептеледі. Бұл есептеу әдісі көлемді есептеу үшін түсірілім (триангуляция) кезіндегі бедердің бетін пайдаланады. Желінің әрбір үшбұрышы тірек жазықтықпен бірге үшбұрышты призманы құрайды. Призмалардың барлық көлемдерінің қосындысы объектінің жалпы көлемін құрайды. Мәліметтерді триангуляциялау нәтижесінде біз одан әрі талдау үшін жыраның БСУ-ін аламыз (5-сурет).

2 жылдық бақылау кезіндегі шайылған топырақ массасының көлемін есептеу. RiSCAN PRO бағдарламасымен есептеу әдісіне байланысты нүктелік бұлттан (сканерлеу немесе полидата нысандары) немесе жасушалардан (тек полидата нысандары) объектілердің көлемін әртүрлі жолмен есептей алады.

Белгілі бір кезеңдегі жырадағы шайылған топырақ көлемін анықтау үшін әртүрлі кезеңдерге БСУ-ін дайындау қажет. Бір жобада әртүрлі жылдардағы дайындалған БСУ-ін ашып, көлемді есептеу

опциясын қолдана отырып, кубтық бірлігіндегі сандық деректер алынды (6-сурет).



Сур. 5. 2 жылдағы жыра топырағының шайылуын анықтайтын 3D моделі: а – 2018 жыл, б – 2017 жыл.

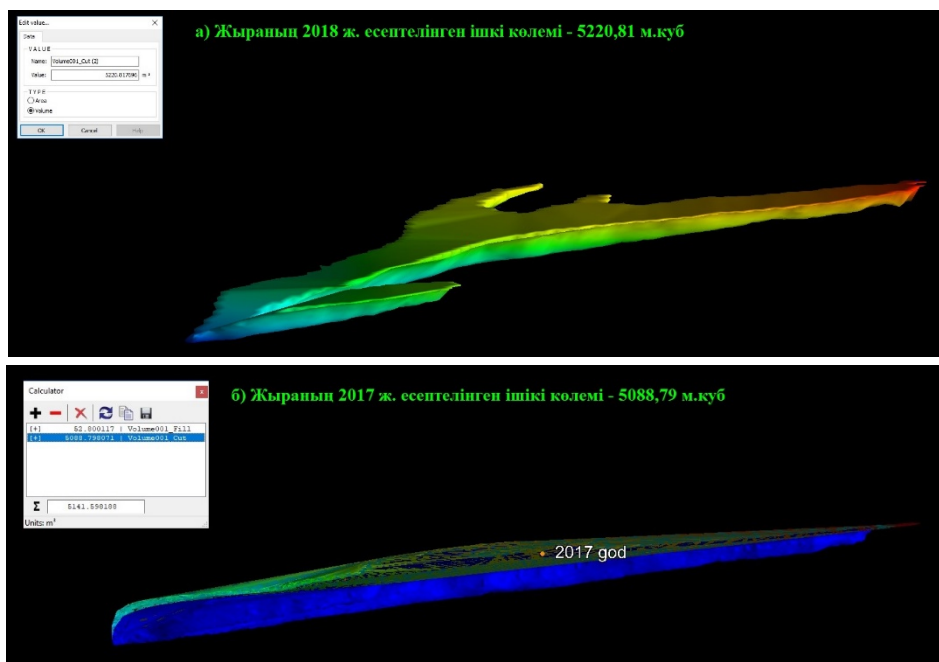
Жазықтық пен алынған бет арасында көлем есептеледі. БСҮ-ін көптеген зерттеулерде, соның ішінде геоморфологиялық зерттеулерде қолданылады. Lin z. З. және басқа да ғалымдар өз еңбектерінде БСҮ-ін қолдана отырып, кішігірім тектоникалық-геоморфологиялық ерекшеліктерді және Жапонияның орталық тауларындағы кемшіліктерді анықтады [7]. Басқа жұмыстарда ғалымдар БСҮ түріндегі жер бетіндегі лазерлік сканерлеудің нәтижелерін қолдана отырып, қауіпті үдерістердің алдын алу үшін әртүрлі литологиялық жыныстардың беткейлеріндегі жарықтарды анықтады [15].*Алынған сандық мәліметтер.* Мұқыр өзені аңғарындағы жыралық эрозияны зерттеу жыралардың алаңдық таралуын, олардың өсу жылдамдығын, сондай-ақ оның дамуының басқа да себептерін анықтауға бағытталған. Алынған ЖЛС деректерін қолдана отырып, жекелеген бақылау учаскелерінің бойында Мұқыр өзені аңғарының екі жылдық БСҮ-сі жасалды. Нәтижелер көрсетіп отырғандай, осы қолайлы әдіс көмегімен қарқынды дамып келе жатқан жыраларды тез

анықтап, сандық мәліметтер алады. ЖЛС әдісін қолдану арқылы алынған әртүрлі жылдардағы сандық биіктік модельдерінің талдауы негізінде топырақ массаларының шайылған көлемінің жылдамдығы және жыра шыңдарының өсуі бағаланды.



Сур. 6. Жыраның 3D моделінің ішкі көлемін анықтау үшін толтырылған пішін.

Тасымалданатын материалдың көлемін және жыра шыңдарының биіктігін анықтау үшін шекті айырмашылық әдісіне негізделген аналитикалық шаралар жүргізілді. 2017...2018 жж. зерттелген жыраның негізгі бөлімінде шайылған топырақтың мөлшері 85 м үшін 132,02 м³ болды (7-сурет). Шайылған жер көлемінің маңызды сандық деректері Мұқыр өзенінің аңғарындағы эрозия үдерістерінің салдары болып табылады. Эрозиялық үдерістерде нөсер жаңбыр кезіндегі су энергиясы жыраның шыңдары, шеткі қырларын, беткейлері мен тальвегтерінің негізін шайып әлсіретеді, бұл олардың морфологиясы мен морфометриясының өзгеруіне әкеліп соғады, нәтижесінде, жыралы-сайлы жүйесінің өзгеруі мен даму динамикасын күшейтеді.



Сур. 7. 2 жылдағы жыра топырағының шайылуын RiSCAN PRO бағдарламасында есептеу нәтижелері: а – 2018 жыл, б – 2017 жыл.

Қорытынды. Орындалған жұмыстардың нәтижесі – жыралар өсуінің сандық морфометрикалық деректері болып табылады. Нүктелік бұлт түріндегі жыралардың алғашқы алынған үш өлшемді деректері болашақ бақылаулардың негізі болып табылады. Негізгі учаскеде табиғи жағдайлар кешені мен олардың өзгеруіне байланысты зерттелетін жыралардың әрқайсысының өсу серпіні анықталды. Мұқыр өзенінің аңғарында жыралардың өсуін анықтайтын факторлар субстраттың механикалық құрамы, атмосфералық жауын-шашын (көктемгі су ағысы, жазғы нөсер), тальвег пен беткейлердің ұзындығы болып табылады. Алынған материалдар негізінде жыралық эрозия Мұқыр өзені аңғары бедерін өзгертуші ең қарқынды факторы болып табылады деп айтуға мүмкіндік береді.

Жыралық эрозия – бұл жердің едәуір нашарлауына әкеліп соқтыратын негізгі факторлардың бірі. Салдарынан көптеген ауылшаруашылық жерлерінің сапасы жоғалып, одан қорғауға қосымша қаржылай шығындарға әкеліп соқтырады. Бұл үдерістің қарқынды дамуы аймақтағы табиғи-антропогендік ортаның экологиялық шиеленісін арттырады. Жыра жүйесінің өсуі, оның қарқынды дамуы ауыл шаруашылығы жерлерінің сапасын нашарлатады, жол және

инфрақұрылым объектілеріне қауіп төндіреді. Соңғы уақытта жыралық эрозияға қарсы күрес іс-жүзінде ұйымдастырылмауда, бірақ бұл жағымсыз үдерістің экологиялық және экономикалық салдары Мұқыр өзенінің аңғарына ғана емес, сонымен қатар көптеген өнім шығаратын ауыл шаруашылық жерлері бар бүкіл Жетісу өңірі үшін де маңызды.

Бедер түзуші үдерістерді зерттеуде ЖЛС әдісін жүйелі және ұзақ мерзімге қолдану эрозия үдерісінің қауіптілігін бақылауға, жер бедерінің коршаған ортаның қызметі мен морфометриясының қорытынды сипаттамасын жақсартуға, сонымен қатар олардың дамуын бақылауға мүмкіндік береді. ЖЛС әдісі сандық деректерді алудың және жыра жүйесінің даму заңдылықтарын анықтаудың кең мүмкіндіктерін ашады. Жоғары дәлдікке ие бұл әдіс басқа геоморфологиялық үдерістерді тіркеуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері жыралық эрозия үдерісінің қауіптілігін бағалауға, сондай-ақ бейімделген қарсы шараларды жоспарлауға және іске асыруға жауапты жергілікті билік органдарына сенімді мәліметтер береді. Алынған нәтижелер инфрақұрылымдық және ауыл шаруашылығы жұмыстарын жоспарлау және жүргізу кезінде өзекті болып табылады және жыралық эрозияның таралуына, сондай-ақ ықтимал қауіптілігіне байланысты жерді қорғау жөніндегі іс-шараларды талап етеді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Республика Казахстан. Том 1. Природные условия и ресурсы / Под ред. Н.А. Искаков, А.Р. Медеу. – Алматы, 2006. – 202 с.
2. Abellán A., Jaboyedoff M., Oppikofer T., Vilaplana J.M. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2009. Vol. 9, Issue 2. Pp. 365-372.
3. Atticus E.L. Stovalla, Jacob S. Diamondc, Robert A. Slesakd, Daniel L. McLaughlinc, Hank Shugart. 2019. Quantifying wetland microtopography with terrestrial laser scanning. *RemoteSensingofEnvironment* 232 (2019).
4. Avian M., Bauer A. First results on monitoring glacier dynamics with the aid of terrestrial laser scanning on Pasterze Glacier (Hohe Tauern, Austria) // *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*. 2006. Vol. 41. Pp. 27-35.
5. Bienert A., Maas H.-G., Scheller, S. Analysis of the information content of terrestrial laserscanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters // *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14th –15th Feb 2006, Vienna.

6. Forman P., Parry I. Rapid data collection at major incident scenes using three-dimensional laser scanning techniques // Proceedings of 35th International Carnahan Conference on Security Technology, October 16-19, 2001, London, England. Pp. 60-67.
7. Lin Z., Kaneda H., Mukoyama S., Asada N., Chiba T., 2013. Detection of subtle tectonicegeomorphic features in densely forested mountains by very-high-resolution airborne LiDAR survey. *Geomorphology* 182 (0), 104-115.
8. Nicholas R Goodwin, John D Armston, Jasmine Muir, Issac Stiller. Monitoring gully change: A comparison of airborne and terrestrial laserscanning using a case study from Aratula, Queensland // *Geomorphology*. 2017. Vol. 282, Pp. 195-208.
9. Pfeifer N., Lindenbergh R., Rijntjes C. Dune monitoring with terrestrial laser scanning at Egmond beach. Technical report, 2005.
10. Poulton C.V.L., Lee J., Hobbs P., Jones L., Hall M. Preliminary investigation into monitoring coastal erosion using terrestrial laser scanning: case study at Happisburgh, Norfolk // *Bulletin of the Geological Society of Norfolk*. 2006. № 56. Pp. 45-64.
11. Hobbs P.R.N., Humphreys B., Rees J.G., Tragheim D.G., Jones L.D., Gibson A., Rowlands K., Hunter G., Airey R. Monitoring the role of landslides in 'soft cliff' coastal recession // *Instability - Planning and Management / McInnes R.G., Jakeways, J. (eds.)*. Thomas Telford, London, 2002. – Pp. 589-600.
12. Hodge R., Brasington J., Richards K. Analysing laser-scanned digital terrain models of gravel bed surfaces: linking morphology to sediment transport processes and hydraulics // *Sedimentology*. 2009. Vol. 56, Issue 7. – Pp. 2024-2043.
13. <http://riegl.com/>[Электронный ресурс].
14. Hunter G., Pinkerton H., Airey R., Calvari S. The application of a long-range laser scanner for monitoring vol-canic activity on Mount Etna // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2003. Vol. 123, Issues 1-2. – Pp. 203-210.
15. TingCao, AnchengXiao, LeiWua, LiguangMaoc, 2017. Automatic fracturedetection based on Terrestrial Laser Scanning data: A new method and casestudy. *Computers & Geosciences*. Volume 106, September 2017. – P. 209-216.
16. Zhen Li, Yan Zhang, Qingke Zhu, Song Yang, Hongjun Li, Huan Ma. Agully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area // *Catena*. 2017. Vol. 148. – Pp. 195-203.

Поступила 16.07.2020

Канд. геогр. наук
PhD

Е.Е. Халыков
Ю.Ф. Лый
Е.Х. Какимжанов
М.М. Макимбаева
Ж.М. Шарапханова

ИЗУЧЕНИЕ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Ключевые слова: овражная эрозия, овраги, наземное лазерное сканирование, космические снимки, река Мукуыр, Жетысу Алатау

Одним из самых быстроразвивающихся методов исследования рельефа земли и других объектов на сегодняшний день является метод наземного лазерного сканирования (НЛС). Эффективность метода наземного лазерного сканирования можно объяснить тем, что за короткий промежуток времени можно собирать много информации и вести мониторинг больших территории исследований. Использование наземного лазерного сканирования в естественных науках и при изучении природы активно развивается в Западной Европе, США и других развитых странах.

В статье описаны основные этапы метода НЛС в изучении оврагов. Высокоточный 3D лазерный сканер RIEGL VZ-4000 был использован для получения подробной цифровой модели оврагов, а полученные данные обрабатывались с применением программы RiscanPro.

В долине реки Мукуыр (Алматинская область, район Коксу) в осенний сезон 2017...2019 гг. проводились исследование овражной эрозии с применением метода НЛС и с использованием космических снимков. Большинство оврагов в этой долине растут, имеющие прирост вершинной и глубинной частей, преимущественно за счет флювиальных процессов. Статья содержит результаты полевых и камеральных исследований методом НЛС. Показаны факторы, способствующие развитию овражной эрозии, приведены морфометрические характеристики оврагов, полученных на основе современных приборов и космических снимков.

Актуальность исследований овражной эрозии в данном регионе определяется потребностями в планировании допустимых нагрузок на природную среду, в экологически безопасном плане. Овражная эрозия наиболее опасна в предгорных и равнинных районах, где в настоящее время площади эродированных земель увеличивается

ются, снижается их продуктивность. Результатом проявления овражной эрозии является не только экологический (потеря плодородия), но и экономический ущерб (снижение эффективности сельскохозяйственного производства).

Ye.Ye. Khalykov, Yu.F. Lyy, Y.Kh.Kakimzhanov, M.M. Makimbayeva, Zh. M. Sharapkanova

STUDY OF GULLY EROSION USING METHOD OF TERRESTRIAL LASER SCANNING

Key words: gully erosion, gully, terrestrial laser scanner, satellite images, Mukyr river, Zhetysu Alatau

One of the fast developing methods of study of the Earth relief and another objects in the present time is the method of terrestrial laser scanning. Efficiency of the method of terrestrial laser scanning could be explained by the short period of time allowing to collect a lot of information and conduct monitoring of big territories of study. Use of terrestrial laser scanning in natural sciences and by nature study is actively developing in Western Europe, USA and another developed countries.

In the article described the main stages of terrestrial laser scanning by gully erosion studies. High resolution 3D laser scanner RIEGL VZ-4000 was used to receive detailed digital model of the gullies and the data was developed with the use of software RiscanPro.

In the valley of Mukyr river (Almaty region, Koksuz district) in the Autumn season of the years 2017...2019 were conducted researches of gully erosion by using method of terrestrial laser scanning and satellite images. The majority of the gullies in this valley are growing and have grows in upper and deep parts and mainly due to fluvial processes. The article contains results of field and laboratory works using method of terrestrial laser scanning. The factors contributing to development of gully erosion are shown and morphometric gully erosion characteristics received on the base of modern devices and satellite images are provided.

Actuality of gully erosion study in this region is determined by needs of planning of allowable loads to the environment in ecologically safe meaning. Gully erosion is most dangerous in piedmont and plain regions where in the present time the areas of erosive lands are increasing and their productivity is decreasing. The result of gully erosion processes is not only ecological (loss of fertility) damage but also economical loss (low efficiency of agricultural sector).