

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-3-127-138.38>

FTAMP:39.03.15 39.00.00

ӨОЖ 910.3

В. В. Жданов^{*1}, Н. У. Кужагельдина², Т. С. Гуляева³¹ Т.ғ.к., аға ғылыми қызметкер(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; zhdanovvitaliy@yandex.kz)² PhD докторант, климаттық зерттеулер басқармасының басшысы(Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, РМК «Қазгидромет», Алматы, Қазақстан; nuraily@mail.ru)³ Т.ғ.к., жетекші ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; gulyaeva-tamara@inbox.ru)

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ҚАР КӨШКІНІ ҚАУПІН МОНИТОРИНГТЕУ ЖӘНЕ БОЛЖАУ ӘДІСТЕРІ (АРТЫҚШЫЛЫҚТАРЫ, КЕМШІЛІКТЕРІ ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ)

Аннотация. Шолу мақала қар жамылғысын бақылаудың және қар көшкінін бол-жаудың қолданыстағы және перспективалы әдістеріне арналған. Мақалада осы саладағы отандық және шетелдік басылымдарға талдау жасалды. Қолданыстағы болжау технологияларының артықшылықтары мен кемшіліктері анықталды. Ұлттық гидрометеорологиялық қызметтің қар көшкіні бөлімінің практикалық жұмысында XX ғасырдың 70-80 жылдарында жасалған мониторинг пен болжаудың қолмен жасалатын әдістері қолданылады. Олардың артықшылығы – қарапайым, арзан және сенімді. Сондықтан олар әлі күнге дейін бақылау станцияларының желілерінде қолданылады. Тұтынушылар үшін қар көшкінінің түсуі туралы нақты мағлұматтар емес, үлкен аумақ бойынша жалпы анықтамалар бар ұсынымдар жасалады. Қазіргі жағдайда құрылғылардың дәлдігі мен ескертулердің сапасы көптеген ақпарат тұтынушыларына сәйкес келмейді. Біз қар көшкінін бақылау және болжау саласындағы әлемдік тәжірибе мен заманауи әзірлемелерді зерттедік. Перспективалық әдістерге талдау жасалды және оларды енгізу бойынша ұсыныстар берілді. Қар көшкініне қарсы қызметті жетілдірудің бірнеше бағыты бар: автоматтандырылған мониторинг жүйелеріне көшу, болжаудың ықтималдық нысандарын енгізу, қар көшкінінің қауіптілігін бағалау үшін ауа-райын болжаудың сандық әдістерін және жасанды интеллектті қолдану. Бірақ перспективалы ғылыми зерттеулерді енгізу үшін жаңа нормалар және оқу құжаттарын әзірлеу қажет. Модельдеу мен қашықтықтан зондтаудың көптеген әдістерінің бір кемшілігі – далалық бақылау деректерімен калибрленбеген. Оларды іс жүзінде енгізу үшін алдымен қателер мен сәйкестік стандарттарын анықтау бойынша зерттеулер жүргізу қажет.

Түйін сөздер: көшкін қаупі, қар жамылғысы, бақылау, болжау.

Кіріспе. Қар көшкіні экономикаға және халыққа үлкен зиян келтіреді. Олардың ықпалына Қазақстан Республикасының бүкіл аумағының 10%-дан астамы ұшыраған. Олар Шығыс Қазақстан, Алматы, Жетісу, Жамбыл, Түркістан облыстарының таулы аймақтарында кең таралған. Қар көшкіні әсіресе туризм мен тау шаңғысы өнеркәсібіне, автомобиль және темір жолдарға қатты әсер етеді [1, 2]. Қар көшкінінен қорғаудың бірнеше әдістері бар. Бұл инженерлік қорғаныс құрылымдары, қар көшкінін алдын алу және көшкін қаупін болжау. Инженерлік қорғаныстың құны жоғары болғандықтан кең таралмаған. Алдын ала қар көшкіндерін түсіру эпизодтық және таңдамалы түрде жүргізіледі. Қар көшкіні қаупінің болжамдары мен ескертулері үнемі және барлық жерде қолданылады [3, 4].

Қауіпті қар жағдайын бақылау және болжау бойынша міндеттер «Қазгидромет» РМК-ға жүктелген. «Азаматтық қорғаныс туралы» заңға сәйкес, Төтенше жағдайлар министрлігі Гидрометеорологиялық қызметтің «Дауылды ескерту» негізінде ғана төтенше жағдай жариялай алады [5]. Бұл елдегі қар көшкіні қаупін бақылауға және болжауға уәкілетті жалғыз ұйым.

Қазақстанның қар көшкіні қызметінің туған жылы 1966 жыл. Сол жылы әдеттен тыс қарлы қыс пен қар көшкіні апатынан кейін Іле Алатауындағы Үлкен және Кіші Алматы өзендерінің бассейндерінде алғашқы қар көшкіні бекеттері ашылды. Одан кейін қар мен қар көшкінін өлшейтін кешенді партия ұйымдастырылып, еліміздің басқа өңірлерінде де қар көшкінін бақылау бекеттері ашылды. Онда қар көшкінін жүйелі түрде бақылау және көшкін қаупінің болжамдарын шығару

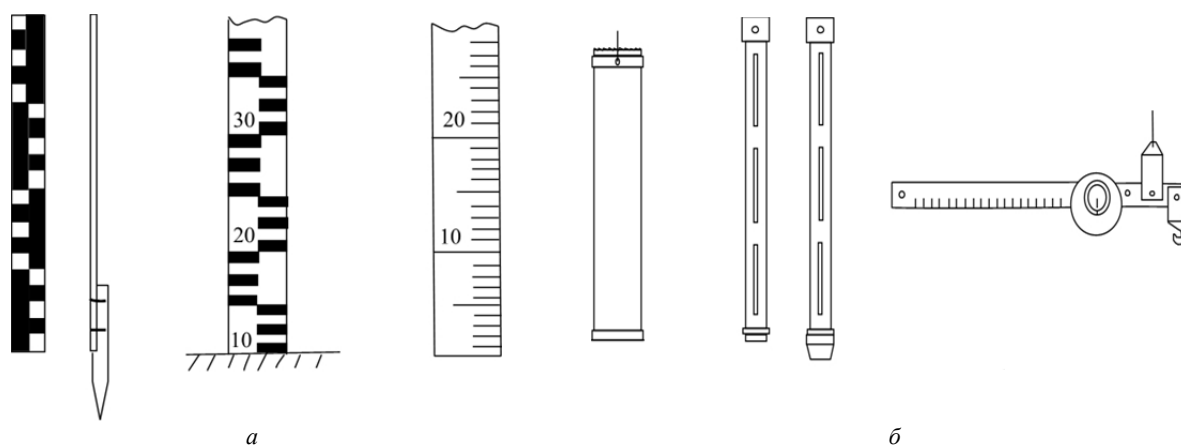
қолға алынды [6, 7]. Сонымен қатар, қар көшкіні мен қар жамылғысына қатысты ғылыми зерттеулер жүргізілді. Қар көшкінін болжау және алдын алудың ғылыми әдістері жасалған [8-12].

Зерттеу материалдары мен әдістері. Қазақстанда және әлемде қар көшкіні қауіптілігін мониторингтеу және болжау әдістеріне шолу жасау, оларды сыни тұрғыдан талдау, артықшылықтары мен кемшіліктерін айқындау. Елдегі қар көшкініне қарсы қызметті жаңғырту бойынша ұсыныстар беру. Бұл шолу гидрометеорология, гляциология, география бағыттарында білім алатын студенттерді даярлауда пайдалы болуы мүмкін. Мұндай мамандар РМК «Қазгидромет», ММ «Қазселесезащита» және ҚР ТЖМ жүйесінде сұранысқа ие. Қар көшкіні қауіптілігін және қатерін бағалау саласындағы білімдер халық мен нысандарды қорғаудың тиімді әдістерін әзірлеу үшін қажет.

Шетелдік және отандық жарияланымдардың, электрондық және қағаз мұрағаттардың, диссертациялық еңбектер мен қар көшкінін зерттеуге арналған анықтамалықтардың ауқымды көлеміне шолу жүргізілді. Әлемдік қар көшкіні қызметтерінің дамуындағы перспективалық бағыттар айқындалды. РМК «Қазгидромет» пен ММ «Қазселденқорғау» қар көшкіні бөлімшелерінің практикалық жұмысына енгізудің артықшылықтары, кемшіліктері және мүмкіндіктері талданды. Қазақстан жағдайына сәйкес қар көшкіні қауіптілігі мен қатерін бағалаудың заманауи әдістерін бейімдеу үшін табиғи қауіп-қатерлер зертханасында көптеген жылдар бойы тәжірибелік жұмыстар жүргізіліп келеді. Жиналған тәжірибе мақалада баяндалып, болашақ мамандарды даярлауда да пайдалы бола алады.

Зерттеу нәтижелері. Қазақстандағы қар жамылғысының мониторингі. Қазақстан Республикасында «Қазгидромет» РМК бақылау желісінде қар жамылғысының тұрақты мониторингі жүргізіледі. Метеорологиялық станциялар маңында сызықтық қар өлшеу түсірілімдері және жетуге қиын таулы аймақтарда маршруттық қар өлшеу түсірілімдері жүргізіледі. Бақылау пункттері желісінде жетекші құжаттарда бекітілген стандартты құралдар мен өлшеу әдістері қолданылады [13]. Негізгі тапсырма – қар жамылғысының биіктігі, тығыздығы және су құрамы туралы ақпарат жинау. Жедел деректер гидрологиялық және көшкінін болжамдарын құрастыру үшін пайдаланылады. Қар жүктемелері мен климаттық өзгерістерді бағалау үшін ұзақ мерзімді мұрағаттар пайдаланылады.

Қардың қалыңдығы 1, *а*-суретте көрсетілген қар өлшейтін рейка арқылы өлшенеді. Судың құрамы мен қардың тығыздығы 1, *б*-суретте көрсетілген салмақ өлшеуіштің көмегімен өлшенеді. Құрылғылар мен әдістердің көпшілігі КСРО-да XX ғасырдың 60-70 жылдарында жасалған, бірақ әлі күнге дейін бақылау станцияларының желісінде қолданылады.



1-сурет – Стандартты өлшеу құралдары: *а* – қар өлшейтін рейка; *б* – өлшеуіш денситометр

Figure 1 – standard measuring instruments: *a* – snow measuring rake; *b* – measuring densitometer

Қар жамылғысын бақылаудың қолданыстағы әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері 1-кестеде келтірілген. Көптеген зерттеушілердің пікірінше, қар қорын анықтаудың бұл әдістері айтарлықтай қателерді қамтиды. Таулы, ойлы-қырлы жерлерде ол 30%-ға жетуі мүмкін [14, 15]. Бұл рельеф формаларына және қарды желмен тасымалдау қарқындылығына байланысты өлшемдер желісінің сирек болуына және қардың тереңдігінің айтарлықтай ауытқуына байланысты.

1-кесте – Қар жамылғысын бақылаудың қолданыстағы әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері

Table 1 – Advantages and disadvantages of existing methods of snow cover control

Артықшылықтары	Кемшіліктері
Құрылғылардың қарапайымдылығы мен сенімділігі	Деректерді беру жылдамдығының төмендігі
Жабдықтың және оған қызмет көрсетудің төмен құны	Қолмен өлшеуге байланысты жоғары еңбек шығындары
Бақылаушының біліктілігіне жоғары емес талаптар	Аумақты қамтудың шектеулілігі және метеорологиялық элементтердің шағын жиынтығы
Уақтылы тексеруде өлшемдердің дәлдігі қолданыстағы сапа стандарттарына сәйкес келеді	Алаңдарды дұрыс таңдамау немесе жабдықтың ақаулығы кезінде әдістердің үлкен қателіктері

Актинометриялық бақылау деректері жылу балансы мен су балансын есептеу үшін қолданылады. Бірақ олар қазіргі уақытта «Қазгидромет» РМК желісінде жүргізілмейді. Сондықтан гидрологтар жақын жердегі метеорологиялық станциядағы температуралық қосындыларды пайдаланады және жанама әдістерді қолдана отырып, жылу шығыны мен жылу беруді есептеулеріне тура келеді. Бұл гидрологиялық және қар көшкіндерінің болжамдарының қосымша қателіктерін арттырады және SNOWPACK сияқты заманауи математикалық модельдерді пайдалануды қиындатады [16]. Немесе модельдеу үшін әлемдік сандық болжау орталықтарынан алынған қайта талдау деректерін алу қажет. Олар көбінесе жердегі деректермен салыстыруға келмейді және үлкен қателіктерге ие.

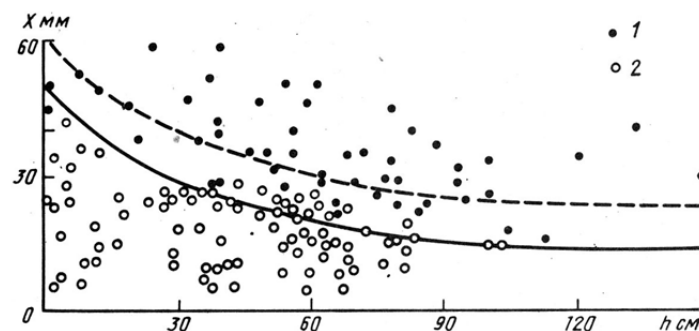
Қазақстандағы қар көшкінін болжау әдістері. Қазіргі таңда «Қазгидромет» РМК-да қолданылатын қар көшкінін болжау әдістері XX ғасырдың 70-80 жылдарында әзірленген [17, 18]. Олардың негізінде болжау инженерлерінің лауазымдық нұсқаулықтары әзірленді. Бұл әдістердің барлығы статистикалық әдістер класына жатады. Олар мұрағат деректерін екі класқа бөлуге негізделген: көшкін қаупі бар немесе көшкін қаупі жоқ жағдайлар. Практикада бөлудің графикалық немесе регрессиялық әдісі қолданылады. Бұл әдістердің артықшылығы оларды пайдаланудың қарапайымдылығы болып табылады, сондықтан олар көшкін станцияларының желісінде белсенді қолданылады. Мұндай болжамдардың дұрыстығы көшкін сарапшысының тәжірибесіне қатты байланысты [19, 20]. Кемшіліктерге нөлдік болжамды жеткізу уақыты және көшкін станциясы қызметкерлерінің біліктілігіне тәуелділік жатады. Қазақстан бойынша барлық болжамдар қауіпті құбылыстың туындау ықтималдығын көрсетпей, категориялық түрде: қар көшкініне бейім немесе көшкінге бейім емес болып құрастырылады және тұтынушыға беріледі.

Іле Алатауындағы қар көшкіні режимін және олардың болжамын алғаш зерттеген И. В. Северский болды [21]. Ол қардың ескі қалыңдығын және қар жауған сайын қардың қалыңдығының өсуін пайдаланып, жаңа қардан қар көшкінін болжау үшін график құрады. Дәл осындай әдісті Е. И. Колесников Үлкен және Кіші Алматы өзендерінің бассейндерінде жаңа түскен қар көшкінін болжау кезінде қолданған [22]. Бұл жағдайда стационарлық алаңдардағы ескі қардың биіктігі туралы деректер пайдаланылды. Бұл әдісті тәжірибеде қолдану қиынға соқты, өйткені Шымбұлақ көшкін станциясының бақылау аймағында 1600-ден 3600 м-ге дейінгі биіктікте үлкен айырмашылықтар бар. Қазіргі уақытта «Шымбұлақ» қар көшкін станциясында И. В. Кондрашов әзірлеген болжамдау әдісі қолданылады.

Жауын-шашын мен қардың түсуінен болатын қар көшкінін болжаудың әмбебап әдісі. Қазақстанда жауын-шашын мен қардың түсуіне байланысты қар көшкінін болжау мәселесі жақсы шешілген [22]. Мұндай көшкіндер жиі кездеседі (70%-дан астам жағдайда). Құрғақ қар көшкіндері болған кезде жауын-шашын мөлшері басым фактор болып табылады. Қар көшкін қызметінің тәжірибесінде көшкіннің пайда болуы үшін қажетті жауын-шашынның шекті мөндерін есептеу үшін әмбебап формула қолданылады. Жауын-шашын шекті деңгейге жеткенде, қар көшкінінің маманы көшкін қаупі туралы ескерту жасайды. Олар 1- формула бойынша есептеледі.

$$X = 50 - a\sqrt{h},$$

мұндағы 50 – қар көшкіні жүретін қар жамылғысының ең аз биіктігіне (сантиметрмен) сәйкес келетін параметр; a – әрбір жеке көшкін қаупі бар аймақ үшін таңдалған эмпирикалық коэффициент. Үлкен Алматы өзен алабы үшін = 4,8; Кіші Алматы үшін – 5,4; h – ескі қардың биіктігі, см.



2-сурет – Үлкен Алматы өзенінің алабында қар көшкіндерінің түсуі үшін қажетті қар жамылғысының критикалық артуын есептеу: 1 – қар көшкіні бар жауын-шашын; 2 – қар көшкіні жоқ жауын-шашын.

Тұтас сызық – қар көшкіндерінің жүруі; нүктелі сызық – қар көшкіндерінің жаппай жүруі

Figure 2 – Calculation of the critical increase in snow cover necessary for the fall of avalanches in the basin of the Big Almaty River: 1 – precipitation with avalanches; 2 – precipitation without avalanches.

A solid line is the course of avalanches; a dotted line is the mass course of avalanches

Жұмысты ыңғайлы ету мақсатында 2-суретте көрсетілген график тұрғызылды. Екі сызық – тұтас және нүктелі – көшкіндері бар және жоқ нүктелер өрісін бөледі. Егер жауын-шашын мөлшері қатты сызықтан жоғары алқапқа түссе, онда қар көшкіні күтіледі; егер нүктелі сызықтан жоғары болса, онда жаппай көшкінін күту керек.

Көктемгі қар көшкінін болжау әдісі. Ескі қардан болатын көктемгі ылғалды қар көшкіндерін болжау әдісін Е. И. Колесников әзірлеген [7, 9]. Қардың беткейдегі тұрақтылық күйі қауіпті қабаттағы қардың беріктігі көрсеткішінің осы қабатқа түсетін қар жүктемесіне қатынасы арқылы анықталады. Қар көшкіндерінің уақытын анықтау үшін тек есептеу әдістері ғана емес, сондай-ақ қар жамылғысының қасиеттері мен метеорологиялық факторлар арасындағы тәуелділіктерді пайдаланатын эмпирикалық әдістер де қолданылады.

Іле Алатауындағы қардың көктемгі еру кезеңінде көшкін қаупінің басталу және аяқталу уақытын болжау мәселесін эмпирикалық түрде шешуге әрекет жасалды (2-ші формула). Қардың ылғалдылығына байланысты ағымдағы ΣT шекті мәнге жеткенде, қар көшкіні туралы ескерту жасалады.

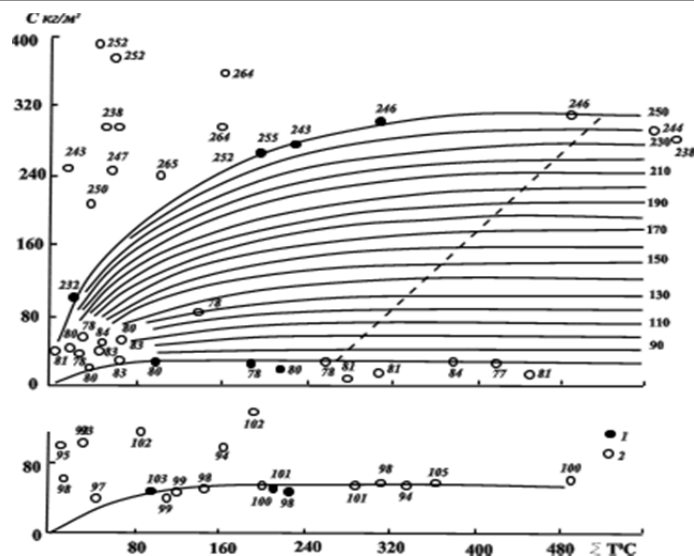
$$\Sigma T = \frac{2,3}{a} \lg \left(1 - \frac{1C}{bW} \right),$$

мұндағы ΣT – ауа температурасының сағаттық қосындысы; C – қар жамылғысының тартылуы (формула 4); W – су эквиваленті; a және b – су эквивалентіне тәуелді эмпирикалық коэффициенттер. Қолдануға ыңғайлы болу үшін эмпирикалық коэффициенттердің мәндері арнайы кестелерде беріледі немесе тәуелділік сызықтары бар есептелген график алдын ала құрастырылады, ал көшкін болжаушысы графиктен ΣT мәндерін алады.

Эмпирикалық деректер графиктерде бейнеленген (3-сурет). Графикті артық жүктемеу үшін W_{100} градациясының деректері жеке графикке шығарылды. Нақты деректерге сүйене отырып, көшкіндері бар және көшкінсіз жағдайлар арасындағы үш градация бойынша шекаралық сызықтар сызылды. Бұл сызықтар тек белгілі бір учаскеде қисық болып, кейін түзу сызықтарға айналатыны анықталды; оларды максималды Ку ретінде қарастыруға болады, ол $W = 80$ мм кезінде 0,35-тен $W = 250$ мм кезінде 1,23-ке дейін артады. W аралық мәндері үшін сәйкес сызықтардың орны сызықтық интерполяция әдісімен анықталады.

Тұрақты қар жамылғысының коэффициенттерін және оң ауа температурасының қосындыларын пайдалана отырып, ылғалды көшкіндерді болжау әдісі болжау мақсатында эмпирикалық формулаларды да, номограмманы да пайдалануға мүмкіндік береді. Осы уақытта ұзақ мерзімді болжамдар да, дауылды ескертулер де мүмкін. Қар көшкіні қауіпін болжау мерзімі мен дәлдігі көбінесе ауа райы болжамының дұрыстығына байланысты [25].

Қазіргі уақытта қар көшкінін бақылау және болжау департаменті тек Алматы қаласының маңындағы жұмыс істеп тұрған қар көшкіндері станцияларының аумағында ғана анықтамалық ұсынымдар әзірлейді [5]. Басқа таулы аймақтар үшін қар көшкінін болжау әдістері сонау 1980 жылдары жасалған, бірақ көп жылдар бойы қолданылмаған [11, 12].



3-сурет – Беткейлердегі қар жамылғысының тұрақтылығын анықтауға арналған номограмма:

1 – қар көшкіні орын алды; 2 – көшкін болған жоқ.

Нүктелер мен сызықтардағы сандар қопсытылған қабат үстіндегі қар қабатының су мөлшері, мм

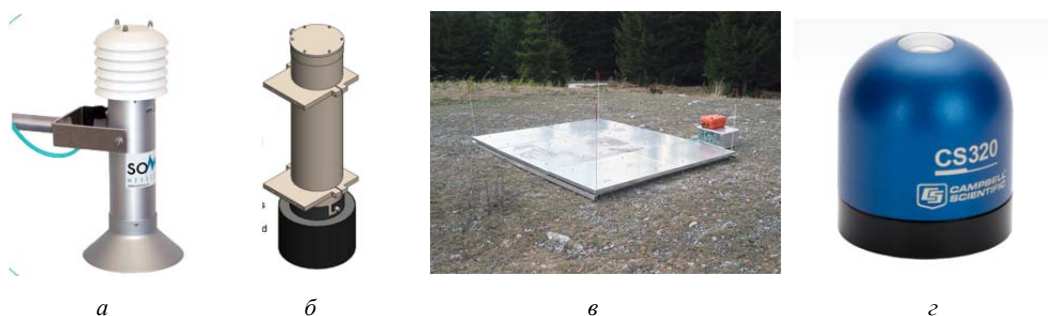
Figure 3 – Nomogram for determining the stability of snow cover on slopes:

1 – there was an avalanche; 2 – there was no avalanche.

Numbers in dots and lines the amount of water of the snow layer above the loosened layer, mm

Жердегі мониторинг жүйесін жаңғырту. Әлемдік тәжірибеде қардың биіктігі мен су мөлшерін өлшеу үшін қолмен, автоматты немесе қашықтан басқарылатын жер үсті мониторинг әдістері қолданылады. Қолмен өлшеу әдістері бүкіл әлем бойынша жету қиын аймақтарда әлі де қолданылады. Бұл жағдайда қолданылатын құрылғылар Қазақстанда қолданылатын құрылғыларға ұқсас. Дегенмен, ДМҰ бақылау нүктелерінің желісі біртіндеп автоматтандырылған бақылау жүйелеріне ауысуда [26, 27]. Стандартты метеостанция алаңында орнатылған электронды датчиктер 4-суретте көрсетілген. Олар қардың қалыңдығы 1 см-ге дейін және қар суының мөлшері 1 мм-ге дейін өлшеу дәлдігіне ие [28].

Мониторинг жүйесін жаңарту кезінде шетелдік жүйелердің артықшылықтары мен кемшіліктерін ескеру қажет. Алматы қаласы Төтенше жағдайлар департаментінің бұйрығымен География және су қауіпсіздігі институтымен Іле Алатауындағы Кіші және Үлкен Алматы өзендерінің бассейндерінде сел және көшкін қаупін автоматтандырылған бақылау жүйесін ұйымдастыру бойынша ауқымды жұмыстар жүргізілді [29]. Бұл тәжірибе «Қазгидромет» РМК жерүсті бақылау желісін жаңғыртуда пайдалы болуы мүмкін.



4-сурет – Қазіргі заманғы автоматтандырылған өлшеу құралдары:

a – лазерлік қар тереңдігі датчигі; *b* – қар жамылғысының су мөлшерін өлшеуге негізделген гамма-сәулелену негізіндегі датчик; *c* – қар суының мөлшерін анықтауға арналған механикалық платформа; *d* – күн сәулеленуінің датчигі

Figure 4 – Modern automated measuring instruments:

a – laser snow depth sensor; *b* – gamma radiation-based sensor based on measuring the amount of water in the snow cover; *c* – mechanical platform for determining the amount of snow water; *d* – solar radiation sensor

Жердегі өлшеу әдістерінен басқа, жерді қашықтықтан зондтау (ЖКЗ) әдістері кеңінен танымал болды. Олардың негізінде математикалық модельдер бар: MODIS, SNOWPACK [30-32]. Олардың бірқатар артықшылықтары мен кемшіліктері бар: артықшылығы – жердегі қызметтерді ұйымдастыру үшін аз еңбек шығындарымен деректерді алу жылдамдығы, ал кемшілігі – өте жоғары құны және өлшеу дәлдігінің төмендігі. Өзірленген көптеген модельдердің кемшілігі олардың деректерінің жердегі мониторинг нәтижелеріне сәйкес калибренбегендігі болып табылады. Қар жамылғысының сипаттамаларын өлшеудің заманауи құралдарын енгізу өлшеу қателіктерін азайту және апаттық ақпаратты беру жылдамдығын арттыру үшін қажет. Бұл өз кезегінде қар жамылғысының заманауи үлгілерін пайдалануға мүмкіндік береді.

Қар көшкінін болжаудағы әлемдік тәжірибені Қазақстан жағдайына бейімдеу. Швейцария қар көшкінін болжау бойынша әлемде көшбасшы болып табылады. 1942 жылдан бастап Давос қаласында қар көшкінін болжау әдістерін әзірлеумен айналысатын Қар және көшкін ғылыми-зерттеу институты (SLF) жұмыс істейді. Әлемде қар көшкіндерінің қауіптілігін бағалау әлі күнге дейін өте субъективті болып табылады және көп жағдайда қар көшкіндері бойынша сарапшының біліктілігіне байланысты [4, 16, 19]. Сондықтан болжаушыға көмектесу үшін үлгіні тану әдістері қолданылады. Олар қар көшкіндерінің қауіптілік деңгейі, қар жамылғысының тұрақтылығы және метеорологиялық жағдайлар арасындағы статистикалық тәуелділіктерді құруға негізделген. Математикалық статистиканың әртүрлі әдістері қолданылады – регрессия, классификация, кластерлік талдау. Әлемдік тәжірибеде SLF әзірлеген ең жақын ұқсастық әдісін (NXD2000) қолданатын қар көшкіндерінің қауіпті жағдайларын тану бағдарламасы кеңінен таралған.

1990 жылдары қар көшкіндерін болжауда жасанды нейрондық желілер қолданылып, олар әлемнің әртүрлі тау аймақтарында тиімділігін көрсетті [33]. Еуропалық Альпілерде қар көшкінінің қауіптілігін болжау ағымдағы қар жағдайын, болашақтағы метеорологиялық шарттарды және олардың қар жамылғысының болашақ күйіне әсерін талдауды қамтиды [34-38]. Сандық модельдер тізбегін синоптиктер метеорологиялық тұрғыдан біркелкі болып саналатын аймақтарда ағымдағы және болашақтағы қар көшкіні қауіпін бағалау үшін пайдаланады.

Үндістанда қолмен бақыланатын ауа райы деректерін пайдалана отырып, қаттылық, ығысу күші, температура, тығыздық, қалыңдығы және қар жамылғысының қабаттарының су эквивалентті сияқты қар жамылғысының параметрлерінің жасанды нейрондық желіге негізделген үлгілері әзірленді [39]. Қар көшкінін болжау үшін қар жамылғысының үлгіленген параметрлері қолданылады.

Еуропа мен Америкада көшкін қауіпінің болжамдары әрқашан ықтималдық түрінде жасалады. Швейцариялық SLF институты осы мақсаттар үшін көшкін қауіпінің бес балдық шкаласын әзірледі. Осыған ұқсас қауіп шкаласы Солтүстік Америкада да бар [40]. Қар көшкіні болжамы шалғай жерлерде орнатылған ауа райы мен қарды автоматты бақылау станцияларының деректерін пайдаланады.

Соңғы жылдары География және су қауіпсіздігі институты қар көшкіні қауіпін бағалау және болжау үшін жасанды интеллектті қолданумен айналысуда [41]. Алынған тәжірибе көшкінге қарсы эксперименттік бюллетень шығаруда қолданылады. Алдағы уақытта бұл технологияны Қазақстан қар көшкіні қызметінің практикалық жұмысына енгізу жоспарлануда.

Қазақстанда қар көшкіні болжамын әзірлеудің келешегі бар бағыттары мыналар болып табылады:

1. Машиналық оқыту және жасанды нейрондық желілер. Компьютерлік бағдарламалар статистикалық есептерді шешуге және үлкен көлемдегі ақпаратты өңдеуге мүмкіндік береді.
2. Ауа райын болжаудың математикалық модельдері. Қар көшкіні туралы ескертулердің орындалу уақытын ұзартады.
3. Қар көшкінінің қауіптілік дәрежесін сараптамалық бағалау және бес балдық шкала бойынша ықтималдық болжамдарды дайындау. Ағымдағы көшкін қауіпін бағалау және қажетті шараларды қабылдау қажет.

Машиналық оқыту және жасанды нейрондық желілер. Қазіргі уақытта жасанды интеллект (ЖИ/АИ) бағдарламалары ғылым мен техниканың көптеген салаларында қолданылады [42]. Қар көшкінін болжауда ЖИ қолданудың ғылыми негіздемесін XX ғасырдың 90-жылдарында Швейцариялық қар және көшкін институтының мамандары берген [43]. Жасанды интеллект – бұл бағдарлама адам миының қасиеттеріне еліктейтін және үйренуге қабілетті заманауи бағдарламалау

саласы. Жиі қолданылатын синоним – машиналық оқыту. Ол ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолданылады және әртүрлі мәселелерді шешуге қабілетті: математика мен статистикадағы есептеулер, мәтіндік файлдарды өңдеу, кескіндерді өңдеу және т.б. Бұл үлкен көлемдегі ақпаратты өңдеуге арналған заманауи құрал. Ол тәуелділіктер әлсіз көрсетілген және статистикалық талдаудың классикалық әдістері нашар нәтиже беретін жерлерде сәтті қолданылады.

Белгілі компьютерлік бағдарламалық жасақтаманы өндірушілердің нейрондық желі қолданбалары бар: MathCad, Statistica StatSoft, Microsoft Excel [44]. Машиналық оқыту әдісінің артықшылығы – бұл болжау инженерінің жұмысын автоматтандыру мүмкіндігі. Кемшілігі – ЖНЖ (жасанды нейрондық желі) оқыту үшін пайдаланылған мұрағаттық деректердің сапасына тәуелділік.

Ауа райын болжаудың математикалық модельдері. Қазіргі уақытта «Қазгидрометтің» қар көшкінін бақылау станцияларында ағымдағы қар көшкіні жағдайын жіктеу әдістеріне қатысты қар көшкінін болжаудың статистикалық әдістері қолданылады. Олар алдын ала ескерту мерзімі нөлге тең болады. Мұндай болжау әдістері қазіргі заманғы «трендтерді болжау» немесе «наукастинг» атауын алды. Жеткізу уақытын ұлғайту мәселесін ауа райы болжаудың қазіргі сандық үлгілері арқылы шешуге болады [45]. Қазіргі заманғы орта мерзімді болжамдар әлемдік болжау орталықтарында құрастырылады және Дүниежүзілік метеорологиялық ұйымға (ДМҰ) мүше елдерге тегін таратылады. Модельдер жер бетіндегі және биіктіктегі негізгі метеорологиялық параметрлерді болжауға қабілетті: ауа температурасы, қысым, ылғалдылық, жел [46]. Модельдер жаһандық, аймақтық және ұлттық болып бөлінеді. Ең танымал және жетілдірілген жаһандық математикалық болжау үлгілері GFS (Вашингтон қ., АҚШ) және ECMWF (Реддинг қ., Ұлыбритания) болып табылады. Росгидромет сияқты аймақтық модельдер де танымал. Қысқа мерзімді болжамдардың статистикалық дәлдігі (1-3 күн): жауын-шашын болжамы үшін 80% және ауа температурасының болжамы үшін 90%.

Ауа райын математикалық модельдеу нәтижелерімен алмасу екі байланыс арнасы арқылы жүзеге асырылады: кәсіби және әуесқой. Көптеген ауа райы болжамы сайттары модельдеу деректерін пайдаланады және сайтта жұртшылық пен туристер үшін болжам карталарын жариялайды. ДМҰ-ға мүше елдердің болжау орталықтары кәсіби байланыс арналарын пайдаланады, қолжетімділік арнайы бағдарламалар арқылы қамтамасыз етіледі. Осыған ұқсас бағдарламаларды көптеген ғылыми орталықтар жасауда, мысалы, «ФОБОС» немесе «Мэп Мейкер» (Ресей) ғылыми-техникалық орталығы (FTO) [46].

Қар көшкінін болжаудың негізгі болжаушылары ауаның максималды температурасы және жауын-шашын мөлшері (қар жамылғысының ұлғаюы) [21-24]. Сондықтан бұл параметрлердің болжамы көшкін туралы ескертулерді жеткізу уақытын ұлғайту үшін өте маңызды. Болжау үлгілеріндегі қателіктерге байланысты көшкіндерді болжаудағы қателер, әсіресе ұзақ кезеңдерде өсуде. Қар көшкінін болжауда ауа райы болжамының сандық үлгілерін қолданудың артықшылығы болжамның орындалу мерзімінің және қажетті шараларды қабылдау уақытының ұлғаюы болып табылады. Кемшілігі – болжамды жеткізу уақытының ұлғаюымен болжау қателерінің көбеюі.

Талқылау. *Болжаудың ықтималдық формалары.* ТМД елдеріндегідей Қазақстанда да Кеңес Одағы кезінде қабылданған төтенше жағдай туралы ескерту жүйесі бар. Барлық нормативтік және нұсқаулық құжаттар табиғи апаттар болжамын тек бір мәнді тұжырымдауға мүмкіндік береді. ИӘ немесе ЖОҚ. Мемлекеттік қызметте болжамдардың ықтималды тұжырымдарына жол берілмейді [5]. Бұл тіпті шағын қар көшкінін күткен кезде ТЖМ «Дауылды ескерту» бойынша әрекет етуге және таулы аймақтарды толығымен жабуға мәжбүр етеді.

Швейцарияның қар және көшкіндерді зерттеу институты көптеген елдерде қолданылатын көшкін қаупінің бес балдық ықтималдық шкаласын әзірледі [40]. Әрбір дәреже қауіптің белгілі бір деңгейін білдіреді. Қар көшкіні қаупінің деңгейі бар кестелерді көптеген шаңғы сайттарында және таулардағы ақпараттық плакаттарда табуға болады. Іле Алатауының жағдайына қолданылатын География және су қауіпсіздігі институты әзірлеген көшкін қаупінің бес балдық шкаласына мысал 2-кестеде келтірілген.

Қар көшкіні қаупінің бес балдық шкаласын пайдалана отырып, ықтималды болжамдарды жүзеге асыру үшін, ең алдымен, оқу материалдарын әзірлеу қажет. География институтында бес балдық шкала бойынша болжам жасау бойынша оқу-әдістемелік құрал мен ұсыныстар әзірленді.

2-кесте – Қар көшкіні қаупінің бес балдық шкаласы

Table 2 – Five point avalanche risk scale

Белгі	Қар көшкіні қаупінің деңгейі	Қар жамылғысының тұрақтылығы	Қар көшкіні ықтималдығы
	1 төмен	Тау беткейлеріндегі қар жамылғысы тұрақты.	Өздігінен және индукциялық қар көшкіндерінің болуы екіталай.
	2 орташа	Тік беткейлерде қар жамылғысы қалыпты, басқа беткейлерде жақсы бекітілген.	Өздігінен қар көшкіні болуы екіталай. Ауыр жүктеме кезінде болуы мүмкін.
	3 маңызды	Тік беткейлерде қар жамылғысы орташа немесе әлсіз бекітілген.	Кішкентай жүктеме кезінде қар көшкіні болуы мүмкін. Белгілі бір беткейлерде өздігінен қар көшкіні жүруі мүмкін.
	4 жоғары	Қар жамылғысы көптеген беткейлерде әлсіз бекітілген.	Өздігінен қар көшкіндері өте ықтимал.
	5 экстремалды	Қар жамылғысы барлық жерде тұрақсыз.	Көптеген өздігінен және арандатылған қар көшкіндерінің болуы сөзсіз.

Қазақстан Республикасының қар көшкіні қызметінің практикалық жұмысына халықаралық тәжірибені енгізу үшін нормативтік-құқықтық базаға өзгерістер енгізу және жаңа нұсқаулықтарды жасау қажет. Солтүстік Америка көшкіндері қауымдастығының көшкіндерді бақылау жөніндегі нұсқаулары бұған негіз бола алады.

Қорытынды. Қазақстан Республикасының қар көшкіні қызметінің 50 жылдан астам тарихы бар. Осы уақыт ішінде бақылау пункттері ашылды, қар көшкінін бақылау мен болжаудың ғылыми әдістері жасалды. Оның өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Біріншіден, қарапайым өлшеу құралдары мен графикалық болжау әдістерінің құны төмен және орындаушылардан төмен біліктілікті талап етеді. Қазіргі жағдайда болжамдардың төмен дәлдігі экономикалық шығындар мен халық пен басқа тұтынушылардың сенімсіздігін тудырады [19].

Болжау әдістерін жаңғырту үшін келесі бағыттарды дамыту қажет:

1. Аумақты қамтуды, байқалатын параметрлердің санын және деректерді беру жылдамдығын арттыруға мүмкіндік беретін жердегі бақылауға арналған заманауи автоматты өлшеу құралдары.

2. Қашықтықтан зондтау әдістерін қолдану. Дегенмен, оларды жүзеге асыру үшін калибрлеу және қателерді анықтау бойынша зерттеу жұмыстары қажет.

3. Ықтималды болжам нысандарын және деректерді визуализациялау құралдарын енгізу бізге ақпаратты тұтынушыға жеткізуге және қауіптіліктің әрбір деңгейі үшін қажетті қорғаныс шараларын әзірлеуге мүмкіндік береді.

4. Жасанды интеллект технологияларын қолданатын автоматтандырылған сараптамалық жүйелер бақылаушылардың біліктілігінен тәуелсіз қар көшкіндері туралы ескертулерді әзірлеуге көмектеседі.

5. Дүниежүзілік метеорологиялық ұйымның дерекқорларынан алынған сандық болжау әдістерін пайдалану дауылды ескертулердің алдын ала уақытын ұлғайтады және шұғыл шараларды қабылдауға уақыт береді.

6. Біртұтас жедел болжамдар орталығын қайта құру және халыққа арналған қар көшкіндері туралы бюллетеньдерді шығару. Үлкен аумақ пен белгілі уақыт аралығындағы жалпы деректерді қамтитын анықтамалар мен ұсынымдар дәлдігі төмен ақпаратты береді. Нәтижесінде, пайдаланушылар оларды елемейді.

7. Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «География және табиғатты пайдалану» факультетінде "Гляциология" ғылыми бағытының ашылуы. Осы бейіндегі мамандар "Қазгидромет" РМК, "Қазселден-қорғау" ММ, "География және су қауіпсіздігі институты" АҚ және ЮНЕСКО қамқорлығымен өңірлік гляциологиялық орталықта сұранысқа ие.

Алғыс. Авторлар мақаланы дайындағаны үшін «Қазгидромет» РМК Алматы қаласы филиалының қар көшкінін жою бөлімшелерінің қызметкерлеріне алғыстарын білдіреді.

Қаржыландыру. Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары Білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен «Қазақстан Республикасының Іле және Жетісу Алатауының таулы аймақтарындағы сел, тау көшкіні және қар көшкіні қауіпсіздігін ғылыми-қолданбалы негіздеу» тақырыбы бойынша жүргізілді. Бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру № BR21881982.

ӘДЕБИЕТ

- [1] Северский И.В., Благовещенский В.П. Лавиноопасные районы Казахстана. – Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1990. – 172 с.
- [2] Северский И.В., Благовещенский В.П. и др. Снежный покров и лавины Тянь-Таня. – Алматы, 2006. – 184 с.
- [3] Снежные лавины. Справочник по прогнозированию и мерам контроля / Пер. с англ. – Москва: Изд-во «Прогресс», 1964. – 250 с.
- [4] McClung D.M. Predictions in avalanche forecasting // Ann. Glaciol. – 2000. – № 31. – Р. 377-381.
- [5] Устав предприятия РГП «Казгидромет». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/activity/normativno-pravovye-akty> (дата обращения 10.09.2024).
- [6] Методические указания по прогнозированию лавин и снеголавинному обеспечению в Казахстане / Под ред. Е. И. Колесникова. – Алматы: РГП «Казгидромет», 2003. – 43 с.
- [7] Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности в Казахстане / Под ред. Е. И. Колесникова. – Алматы: РГП «Казгидромет», 2005. – 262 с.
- [8] Кондрашов И.В. Прогноз лавин и некоторых характеристик снежности в горах Казахстана. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 98 с.
- [9] Колесников Е.И. Способы расчета эмпирических формул для прогноза лавин свежеснежного покрова в малоизученных горных районах. – Ледники, снежный покров и лавины горных районов Казахстана. – Алма-Ата, 1983. – С. 149-162.
- [10] Колесников Е.И., Попов В.И. Режим снежных лавин в низкогорьях Западного Алтая и методы их прогнозирования // Тр. КазНИИ. – 1985. – Вып. 91. – С. 111-127.
- [11] Попов В.И., Зайцева Л.А. О снежном покрове Западного Алтая // Сб. работ Алматинской ГМО. – 1978. – Вып. 8. – С. 3-10.
- [12] Попов В.И., Колесников Е.И., Берман О.А. Массовый сход снежных лавин на Западном Алтае зимой 1976/77 г. // Сборник работ Алматинской ГМО. – 1978. – Вып. 8. – С. 102-111.
- [13] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – Ч. 1-3. – Алматы: Изд-во «Казгидромет», 2006. – 500 с.
- [14] Жданов В.В. Анализ ошибок снеголавинных наблюдений и прогнозов // Вопросы географии и геоэкологии. – 2015. – № 3. – С. 52-55.
- [15] Соседов И.С. Исследование баланса снеговой влаги на горных склонах в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: Наука, 1967. – 198 с.
- [16] Швейцарский федеральный институт изучения снега и лавин. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.slf.ch> (дата обращения 10.09.2024).
- [17] Глазырин Г.Е., Кондрашов И.В. О методической основе лавинных прогнозов // Тр. 3-го Всесоюз. сов. по лавинам. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 155-164.
- [18] Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 200 с.
- [19] Черноус П.А. Государственное регулирование оценивания лавинной опасности в России // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2020. – Т. 2. – № 3. – С. 295-304.
- [20] Schweizer J., Mitterer C., Techell F., Stoffell A., and Reuter B. On the relation between avalanche occurrence and avalanche danger level // The Cryosphere. – 2020. – No. 14. – P. 737-750. – <https://doi.org/10.5194/tc-14-737-2020>
- [21] Северский И.В. Возможности прогноза лавин на северном склоне Заилийского Алатау // Вопросы географии Казахстана. – 1974. – Вып. 16. – С. 141-153.
- [22] Колесников Е. И. Способы прогноза лавинной опасности по интенсивности осадков и снегопадов в горах Заилийского Алатау // Тр. САНИГМИ. – 1972. – Вып. 63(78). – С. 104-121.
- [23] Кондрашов И. В. Опыт прогнозирования лавин из свежеснежного покрова на снеголавинной станции Чимбулак // Тр. САНИГМИ. – 1977. – Вып. 37(118). – С. 31-37.
- [24] Кондрашов И. В. К вопросу о прогнозе лавин, связанных со снегопадами // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1997. – Вып. 4. – С. 60-65.
- [25] Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Федченко Л.М., Узденова А.Б. Методика фоновых прогнозов лавинной опасности для территории горных районов Республики Ингушетия и Чеченской Республики. – 2021. – Т. 15. – № 3. – С. 50-63.
- [26] Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference, Chengdu, China, 2024 / Ed. by S. S. Chernomorets, K. Hu, K. S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. – 594 p.
- [27] Сборник трудов III международного симпозиума «Физика, химия и механика снега». – Южно-Сахалинск, 2017. – Ч. I-II. – 158 с.
- [28] Автоматические метеостанции фирмы Sommer. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sommer.at/en/company/about-us> (дата обращения 10.09.2023).
- [29] Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Жданов В.В., Ранова С.У. Автоматизированный мониторинг селевой и лавинной опасности на территории г. Алматы // Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях». – Москва, 2022. – С. 64-69.

- [30] Apel H., Abdykerimova Z., Agalkhanova M., et al. Statistical forecast of seasonal discharge in Central Asia using observational records: development of a generic linear modelling tool for operational water resource management // *Hydrology Earth System Sciences*. – 2018. – No. 2. – P. 2225-2254. – DOI: 10.5194/hess-22-2225-2018
- [31] Терехов А.Г., Ивкина Н.И., Абаев Н.Н., Елтай А.Г., Егембердиева З.М. Валидация суточного продукта Snow Depth FEWS NET для бассейна реки Урал по данным метеорологических наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 31-40. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40
- [32] Gafurov A., Kalashnikova O., Apel H. Hydrological forecast based on the snow cover index, derived from basin-wide and elevation specific remote sensing snow cover data in mountainous basins // *Geophysical Research Abstracts*. – Vienna: EGU2019. – 2019. – Vol. 21. – P. 66-78.
- [33] Blagoveshchenskiy V., Kondrashov I., Yeserkepova I., Gassner M., Latenser M. Experience in using the NXD2000 program for avalanche forecasting in the Zailiysky Alatau. *Data Glaciol. Stud.* – 2003. – 94. – P. 115-118.
- [34] Bakermans L., Jamieson B., Schweizer J., Haegeli P. Using stability tests and regional avalanche danger to estimate the local avalanche danger // *Ann. Glaciol.* – 2010. – No. 51(54). – P. 176-186.
- [35] Bründl M., Etter H.J., Steiniger M., Klingler C., Rhyner J., Ammann W. IFKIS – a basis for managing avalanche risk in settlements and on roads in Switzerland // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2004. – No. 4(2). – P. 257-262.
- [36] Brabec B., Meister R. A nearest-neighbor model for regional avalanche forecasting // *Ann. Glaciology*. – 2001. – No. 32. – P. 130-134. DOI: 10.3189/172756401781819247
- [37] Cagnati A., Valt M., Soratori G., Gavalda J., Sellés C.G. A field method for avalanche danger-level verification // *Ann. Glaciol.* – 1998. – 26. – P. 343-346.
- [38] Meister R. Country-wide avalanche warning in Switzerland / *International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, U.S.A., 30 October-3 November 1994 ISSW 1994 Organizing Committee, Snowbird UT, USA, 1995*. P. 58-71.
- [39] Singh D., Ganju A. Expert system for prediction of avalanches research // *Communications current science*. – 2008. – Vol. 94, No. 8. – P. 1076-1081.
- [40] European Avalanche Danger Scale (link) URL: http://www.avalanches.org/eaws/en/main_layer.php?layer=basics&id=2 (Дата обращения 01.02.2019 г.).
- [41] Blagoveshchenskiy V., Medeu A., Gulyayeva T., Zhdanov V., Ranova S., Kamalbekova A., Aldabergen U. Application of Artificial Intelligence in the Assessment and Forecast of Avalanche Danger in the Ile Alatau Ridge // *Water*. – 2023. – No. 15. – P. 1438. <https://doi.org/10.3390/w15071438>
- [42] Бишоп Кристофер М. Распознавание образов и машинное обучение / Пер. с англ. Д. А. Ключина. – Москва: Диалектика, 2020. – 960 с.
- [43] Schweizer J., Föhn P.M.B. Avalanche forecasting – an expert system approach // *Ann. Glaciol.* – 1996. – 42(141). – P. 318-332. – DOI: 10.3189/S0022143000004172
- [44] Сайт российского представительства фирмы StatSoft. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.StatSoft.ru> (дата обращения 10.10.2022).
- [45] Флеминг Д. и др. Руководящие указания ВМО по обслуживанию прогнозами и предупреждениями о многих опасных явлениях с учетом их возможных последствий. ВМО. – 2015. – № 1150. – 26 с. (www.wmo.int)
- [46] Программное обеспечение – рабочие столы синоптика. [Электронный ресурс]. – URL: <https://mapmakers.ru/#section-company> (дата обращения 10.10.2024).

REFERENCES

- [1] Severskiy I.V., Blagoveshchenskiy V.P. Avalanche-prone areas of Kazakhstan. Almaty: “Gylym” Publishing, 1990. 172 p. (in Russ.).
- [2] Severskiy I.V., Blagoveshchenskiy V.P., et al. Snow cover and avalanches of the Tien Shan. Almaty, 2006. 184 p. (in Russ.).
- [3] Avalanche. Reference guide on forecasting and monitoring measures / Translation from English. Moscow: “Progress” Publishing, 1964. 250 p. (in Russ.).
- [4] McClung D.M. Predictions in avalanche forecasting. // *Annals of Glaciology*. 2000. No. 31. – P. 377-381.
- [5] Charter of RSE “Kazhydromet”. [Electronic resource]. URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/activity/normativno-pravovye-akty> (accessed 10.09.2024) (in Russ.).
- [6] Methodological guidelines for avalanche forecasting and support in Kazakhstan / Chief editor E. I. Kolesnikova. Almaty: RSE “Kazhydromet”, 2003. 43 p. (in Russ.).
- [7] Practical guidelines for avalanche hazard forecasting in Kazakhstan / Ed. E.I. Kolesnikova. Almaty: RSE “Kazhydromet”, 2005. 262 p. (in Russ.).
- [8] Kondrashov I.V. Avalanche forecasting and some characteristics of snow cover in the mountainous regions of Kazakhstan. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 98 p. (in Russ.).
- [9] Kolesnikov E.I. Methods for calculating empirical formulas for forecasting freshly fallen avalanches in poorly studied mountainous areas // *Glaciers, snow cover and avalanches in the mountainous regions of Kazakhstan*. Alma-Ata, 1983. P. 149-162 (in Russ.).
- [10] Kolesnikov E.I., Popov V.I. Avalanche regime in the intermountain basins of Western Altai and methods for their forecasting. *Kazakh Scientific Research Institute*. Moscow, 1985. P. 111-127 (in Russ.).
- [11] Popov V.I., Zaitseva L.A. On the snow cover of Western Altai // *Proceedings of Almaty State Medical University*. 1978. Issue 8. P. 3-10 (in Russ.).
- [12] Popov V.I., Kolesnikov E.I., Berman O.A. Mass avalanches in Western Altai during the winter of 1976/77 // *Works of the Almaty GMO*. 1978. Issue 8. P. 102-111 (in Russ.).

- [13] Manual for hydrometeorological stations and posts. Section 13. Almaty: RSE "Kazhydromet" Publishing, 2006. 500 p. (in Russ.).
- [14] Zhdanov V.V. Analysis of errors in avalanche monitoring and forecasting // *Issues of Geography and Geoecology*. 2015. No. 3. P. 52-55 (in Russ.).
- [15] Sosodov I.S. Study of the moisture balance of snow on mountain slopes of Ile Alatau. Alma-Ata: Gylym, 1967. 198 p. (in Russ.).
- [16] Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research. [Electronic resource]. URL: <http://www.slf.ch> (accessed 10.09.2024). (in Russ.).
- [17] Glazyrin G.E., Kondrashov I.V. On the methodological basis of avalanche forecasting // *Proc. of the 3rd All-Union Avalanche Conference*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. P. 155-164 (in Russ.).
- [18] Practical guidelines for avalanche hazard forecasting. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 200 p. (in Russ.).
- [19] Chernous P.A. State regulation of avalanche hazard assessment in Russia // *Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena*. 2020. Vol. 2, No. 3. P. 295-304 (in Russ.).
- [20] Schweizer J., Mitterer C., Techel F., Stoffel A., Reuter B. On the relation between avalanche occurrence and avalanche danger level // *The Cryosphere*. 2020. No. 14. P. 737-750. <https://doi.org/10.5194/1025-0718/2020/14/737>
- [21] Severskiy I.V. Possibilities of avalanche forecasting on the northern slopes of the Ile Alatau // *Problems of Kazakhstan Geography*. 1974. Issue 16. P. 141-153 (in Russ.).
- [22] Kolesnikov E.I. Methods of avalanche hazard forecasting in the Ile Alatau mountains based on precipitation and snow intensity // *Proc. SANIGMI*. 1972. Issue 63(78). P. 104-121 (in Russ.).
- [23] Kondrashov I.V. Experience in forecasting avalanches from freshly fallen snow at Shymbulak avalanche station // *Proc. SARNIGMI*. 1977. Issue 37(118). P. 31-37 (in Russ.).
- [24] Kondrashov I.V. On the issue of avalanche forecasting depending on snowfall // *Hydrometeorology and Ecology*. Almaty, 1997. Issue 4. P. 60-65 (in Russ.).
- [25] Kondratyeva N.V., Adzhiev A.Kh., Fedchenko L.M., Uzdenova A.B. Methodology for background avalanche hazard forecasting for mountainous areas of the Republic of Ingushetia and the Chechen Republic. 2021. Vol. 15, No. 3. P. 50-63 (in Russ.).
- [26] Debris flows: disasters, hazards, forecasting, protection // *Proc. of the 7th International Conference, Chengdu, China, 2024* / Eds. S. S. Chernomorets, K. Hu, K. S. Viskhadzhieva. Moscow: "Geomarketing" LLC, 594 p.
- [27] Proceedings of the 3rd International Symposium "Physics, Chemistry and Mechanics of Snow". Yuzhno-Sakhalinsk, 2017. Vols. I-II. 158 p. (in Russ.).
- [28] Sommer automatic weather stations. [Electronic resource]. URL: <https://www.sommer.at/en/company/about-us> (accessed 10.09.2023).
- [29] Medeu A.R., Blagoveshchenskiy V.P., Zhdanov V.V., Ranova S.U. Automated monitoring of mudflow and avalanche hazards in the territory of Almaty city // *Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Hazardous Natural Processes and Geotechnical Monitoring in Engineering Surveys"*. Moscow, 2022. P. 64-69 (in Russ.).
- [30] Apel H., Abdikerimova Z., Agalkhanova M., et al. Statistical forecasting of seasonal runoff in Central Asia using observation records: developing a general linear modeling tool for operational water resources management // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. No. 2. P. 2225-2254. DOI: 10.5194/hess-22-2225-2018
- [31] Terekhov A.G., Ivkina N.I., Abaev N.N., Eltai A.G., Egemberdieva Z.M. Verification of the daily Snow Depth FEWS NET product for the Ural River basin based on meteorological observations // *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2020. Vol. 17, No. 3. P. 31-40. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40 (in Russ.).
- [32] Gafurov A., Kalashnikova O., Apel H. Hydrological forecasting in mountain basins based on snow cover index obtained from remote sensing data: general basin and elevation-based approach // *Abstracts of Geophysical Research*. Vienna: EGU2019. Vol. 21. P. 66-78.
- [33] Blagoveshchenskiy V., Kondrashov I., Yeserkepova I., Gassner M., Latentser M. Experience in using the NXD2000 program for avalanche forecasting in the Ile Alatau // *Data of Glaciological Studies*. 2003. No. 94. P. 115-118.
- [34] Bakermans L., Jamieson B., Schweizer J., Haegeli P. Using stability tests and regional avalanche danger to estimate local avalanche hazard // *Annals of Glaciology*. 2010. No. 51(54). P. 176-186.
- [35] Bründl M., Etter H.J., Steiniger M., Klingler C., Rhyner J., Ammann W. IFKIS – a basis for managing avalanche risk in settlements and roads in Switzerland // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2004. No. 4(2). P. 257-262.
- [36] Brabec B., Meister R. A nearest-neighbor model for regional avalanche forecasting // *Annals of Glaciology*. 2001. No. 32. P. 130-134. DOI: 10.3189/172756401781819247
- [37] Canati A., Walt M., Soratori G., Gavalda J., Selles S.G. Field method for verifying avalanche hazard level // *Annals of Glaciology*. 1998. No. 26. P. 343-346.
- [38] Meister R. Avalanche warning across Switzerland // *International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, USA, October 30 – November 3, 1994*. ISSW 1994 Organizing Committee, Snowbird UT, USA, 1995. P. 58-71.
- [39] Singh D., Ganju A. Research on expert systems for avalanche forecasting // *Current Science Communications*. 2008. Vol. 94. No. 8. P. 1076-1081.
- [40] European Avalanche Danger Scale. [Electronic resource]. URL: http://www.avalanches.org/eaws/en/main_layer.php?layer=basics&id=2 (accessed 01.02.2019).
- [41] Blagoveshchenskiy V., Medeu A., Gulyaeva T., Zhdanov V., Ranova S., Kamalbekova A., Aldabergen U. Using artificial intelligence in avalanche hazard assessment and forecasting in the Ile Alatau ridge // *Water*. 2023. No. 15. P. 1438. <https://doi.org/10.3390/w15071438>
- [42] Bishop, Christopher M. Pattern Recognition and Machine Learning / Translated from English by D. A. Klyushin. Moscow: Dialektika, 2020. 960 p. (in Russ.).

[43] Schweizer J., Föhn P.M.B. Avalanche forecasting – the expert system approach // *Annals of Glaciology*. 1996. No. 42(141). P. 318-332. doi: 10.3189/S0022143000004172

[44] Website of the Russian representative office of StatSoft. [Electronic resource]. URL: <http://www.StatSoft.ru> (accessed 10.10.2022) (in Russ.).

[45] Fleming D., et al. WMO Guidelines on multi-hazard impact-based forecasting and warning services // WMO. 2015. No. 1150. 26 p. (www.wmo.int) (in Russ.).

[46] Software – weather forecaster's workstations. [Electronic resource]. URL: <https://mapmakers.ru/#section-company> (accessed 10.10.2024) (in Russ.).

В. В. Жданов^{*1}, Н. У. Кузгагелдина², Т. С. Гуляева³

¹ К.т.н., старший научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; zhdanovvitaliy@yandex.kz)

² PhD докторант, начальник управления климатических исследований

(КазНУ им. аль-Фараби, РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан; nuraily@mail.ru)

³ К.г.н., ведущий научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; gulyaeva-tamara@inbox.ru)

МОНИТОРИНГ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ В КАЗАХСТАНЕ (ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ)

Аннотация. Обзорная статья посвящена существующим и перспективным методам наблюдения за снежным покровом и прогнозирования лавин. Проведен анализ отечественных и зарубежных публикаций в данной области. Определены преимущества и недостатки применяемых технологий прогнозирования. В практической работе лавинного отдела национальной гидрометеорологической службы используются ручные методы мониторинга и прогнозирования, разработанные в 70–80-х годах XX века. Их преимущество заключается в простоте, дешевизне и надежности, благодаря чему они до сих пор применяются в сети наблюдательных станций. Для потребителей предоставляются не точные данные о сходе конкретных лавин, а общие рекомендации и ориентировочные оценки по крупным территориям. В современных условиях точность оборудования и качество предупреждений не удовлетворяют многих пользователей информации. Рассмотрены мировой опыт и современные разработки в области наблюдения и прогнозирования лавин. Проведен анализ перспективных методов и даны рекомендации по их внедрению. Выделено несколько направлений совершенствования лавинной службы: переход к автоматизированным системам мониторинга, внедрение вероятностных форм прогнозирования, использование численных методов прогноза погоды и искусственного интеллекта для оценки лавинной опасности. Однако для внедрения перспективных научных исследований необходимо разработать новые нормативные и учебные документы. Существенным недостатком многих методов моделирования и дистанционного зондирования является отсутствие калибровки по данным полевых наблюдений. Для их практического применения необходимо предварительно провести исследования по выявлению ошибок и установлению стандартов соответствия.

Ключевые слова: лавинная опасность, снежный покров, наблюдение, прогнозирование.

V. V. Zhdanov^{*1}, N. U. Kuzhageldina², T. S. Gulyayeva³

¹ Candidate of technical sciences, Senior Researcher
(JSC “Institute of Geography and Water Security”, Almaty, Kazakhstan; zhdanovvitaliy@yandex.kz)

² PhD Student, Head of the Climate Research Department
(Al-Farabi Kazakh National University, RSE “Kazhydromet”, Almaty, Kazakhstan; nuraily@mail.ru)

³ Candidate of geographic sciences, Lead Researcher
(JSC “Institute of Geography and Water Security”, Almaty, Kazakhstan; gulyaeva-tamara@inbox.ru)

MONITORING AND FORECASTING METHODS OF AVALANCHE HAZARD IN KAZAKHSTAN (ADVANTAGES, DISADVANTAGES, AND DEVELOPMENT PROSPECTS)

Abstract. This review examines existing and emerging methods for snow cover monitoring and avalanche forecasting. An analysis of national and international studies in this field was conducted. The advantages and limitations of currently used forecasting techniques were identified. In the operational practice of the avalanche division of the national hydrometeorological service, manual monitoring and forecasting methods developed in the 1970s–1980s remain in use. Their strengths lie in simplicity, low cost, and reliability, which explains their continued application within the observation station network. However, end users receive not precise forecasts of individual avalanche events but rather general recommendations and indicative assessments for large territories. Under present conditions, the accuracy of equipment and the quality of warnings no longer meet the needs of many information users. This paper reviews global experience and recent advances in avalanche monitoring and forecasting, analyzes promising approaches, and provides recommendations for their implementation. Key directions for strengthening avalanche services include the transition to automated monitoring systems, the adoption of probabilistic forecasting methods, the application of numerical weather prediction, and the integration of artificial intelligence for hazard assessment. Nevertheless, the practical implementation of advanced research requires the development of updated regulatory and training frameworks. A critical limitation of many modeling and remote sensing techniques is the absence of calibration against field observations. To ensure their operational use, preliminary studies must be carried out to quantify errors and establish calibration standards.

Keywords: avalanche hazard, snow cover, monitoring, forecasting.