

Экспериментальный метод прогноза лавин на основе нейронных сетей

© 2016 г. В.В. Жданов

Институт географии Министерства образования и науки Республики Казахстан, Алматы
Zhdanovvitaliy@yandex.ru

Experimental method to predict avalanches based on neural networks

V.V. Zhdanov

Institute of geography, Ministry of Education and Science, Kazakhstan, Almaty
Zhdanovvitaliy@yandex.ru

Received April 12, 2016

Accepted July 27, 2016

Keywords: *avalanche danger, classification of rainfalls, discriminate function, neural networks, prediction of avalanches.*

Summary

The article presents results of experimental use of currently available statistical methods to classify the avalanche-dangerous precipitations and snowfalls in the Kishi Almaty river basin. The avalanche service of Kazakhstan uses graphical methods for prediction of avalanches developed by I.V. Kondrashov and E.I. Kolesnikov. The main objective of this work was to develop a modern model that could be used directly at the avalanche stations. Classification of winter precipitations into dangerous snowfalls and non-dangerous ones was performed by two following ways: the linear discriminant function (canonical analysis) and artificial neural networks. Observational data on weather and avalanches in the gorge Kishi Almaty in the gorge Kishi Almaty were used as a training sample. Coefficients for the canonical variables were calculated by the software «Statistica» (Russian version 6.0), and then the necessary formula had been constructed. The accuracy of the above classification was 96%. Simulator by the authors L.N. Yasnitsky and F.M. Cherepanov was used to learn the neural networks. The trained neural network demonstrated 98% accuracy of the classification. Prepared statistical models are recommended to be tested at the snow-avalanche stations. Results of the tests will be used for estimation of the model quality and its readiness for the operational work. In future, we plan to apply these models for classification of the avalanche danger by the five-point international scale.

Поступила 12 апреля 2016 г.

Принята к печати 27 июля 2016 г.

Ключевые слова: *дискриминантная функция, искусственные нейронные сети, классификация осадков, лавинная опасность, прогноз лавин.*

Обсуждаются результаты эксперимента по применению статистических методов для классификации лавиноопасных осадков и снегопадов в бассейне р. Киши Алматы в Иле (Заилийском) Алатау. Для разделения осадков на лавино- и нелавиноопасные выбраны два способа: дискриминантная функция и искусственные нейронные сети. Разработана экспериментальная модель классификации осадков и снегопадов, оценены ошибки классификации на независимом материале.

Введение

Снежные лавины – весьма распространённое явление в горных районах Казахстана. Объёмы лавин могут меняться от нескольких десятков до сотен тысяч кубических метров. Лавинную опасность необходимо обязательно учитывать при освоении горных районов и планировании хозяйственной и рекреационной деятельности. Лавиноопасные районы находятся на юге, юго-востоке и востоке республики. Ежегодно в горах регистрируется сход сотен лавин, но большинство из них отмечаются в отдалённых необжитых районах. Существуют различные методы борьбы с лавинами, среди которых: прогнозирование, предупредительные спуски, ин-

женерные методы защиты и различные информационно-профилактические мероприятия.

В Казахстане и других странах СНГ самый распространённый способ – прогнозирование лавинной опасности. В период лавинной опасности с ноября по май в специализированных подразделениях Республиканского государственного предприятия (РГП) «Казгидромет» составляется ежедневный снеголавинный бюллетень. Выдаётся фоновый (общий) прогноз по горным районам республики и локальные прогнозы в зонах ответственности снеголавинных станций. На их основе Комитет по чрезвычайным ситуациям (КЧС) принимает необходимые меры: закрывает объекты, ограничивает доступ людей, предупреждает туристов, организует про-

филактические спуски. Точный прогноз необходим для обеспечения безопасности населения и объектов в горах. Современные математические модели позволяют улучшать качество снеголавинных прогнозов, а следовательно, предупреждать население и государственные службы об опасном явлении.

Постановка проблемы

Проблема прогноза лавин всегда была актуальной в лавиноведении. Методы прогноза лавин очень разнообразны. В Казахстане в оперативной деятельности снеголавинной службы Казгидромета разрешается использовать только прошедшие производственные испытания и утверждённые уполномоченным органом методы. К ним относятся методы, разработанные И.В. Кондрашовым и Е.И. Колесниковым [1, 2]. С их помощью прогнозируются лавины, связанные со снегопадами и оттепелями. Основные предикторы для прогноза лавин, связанных со снегопадами, – количество выпавших осадков (или прирост снега) и толщина старого снега, а для прогноза лавин, связанных с оттепелями, – сумма положительных температур воздуха. Используемые в настоящее время в Казахстане методы прогноза лавин разработаны в 1980-е годы на основе материалов наблюдений за лавинами с 1966 по 1980 г. Оправдываемость прогнозов составляет около 90%. Отметим, что качество прогнозов в значительной мере зависит не столько от совершенства метода прогноза, сколько от опытности наблюдателя снеголавинной станции, отвечающего за прогноз.

Большинство лавин в горах Иле Алатау (примерно 80% случаев) связаны с осадками и снегопадами. В Казахстане лучше всего решена проблема прогноза лавин этого типа. Немного хуже прогнозируются весенние лавины, обусловленные оттепелью, и лавины метелевого генезиса. Оперативная деятельность снеголавинной службы Казгидромета определяется основным руководящим документом [3]. Оно разработано на основе руководства [4]. Используемые методы прогнозирования относятся к графическим методам прогноза лавин. Основу составляют графики, разделяющие осадки и снегопады на два класса: лавиноопасные и не-

лавиноопасные. Критический прирост снега и количество осадков зависят от толщины старого снега на склоне. Массив данных для разработки методов прогноза берётся из многолетних наблюдений на снеголавинных станциях. Использование в качестве предиктора прироста свежевыпавшего снега целесообразно только для сухих лавин. В качестве предиктора для прогноза любых лавин, связанных с осадками и снегопадами, часто используют не толщину снега, а количество осадков. Эти методы, простые и надёжные в оперативной работе, имеют небольшую заблаговременность.

В настоящее время появилась настоятельная необходимость модернизации методов прогноза лавин в Казахстане. Это объясняется рядом причин. Сейчас имеется много новой информации об условиях схода лавин, на основе которой можно улучшить существующие методы прогноза. Кроме того, в снеголавинной службе практически не осталось опытных специалистов-лавинщиков, поэтому качество прогноза лавин ухудшилось. Появилось много перестраховочных прогнозов. В данной статье показываются возможные пути усовершенствования методов прогноза лавин на основе традиционных дискриминантных функций и более современных нейронных сетей.

Адаптация современных способов прогнозирования лавин имеет большое значение для развития снеголавинной службы Казгидромета. В настоящее время для прогноза лавинной опасности используют различные методы: дискриминантный анализ, экспертные оценки, метод распознавания образов, множественную регрессию, синоптический прогноз и т.д. [5]. Чаще всего это – статистические методы, основанные на анализе многолетних наблюдений. Широкое распространение получили и линейные дискриминантные функции [6]. Существуют также способы моделирования устойчивости снежного пласта на склоне с применением наблюдений на ближайших метеостанциях [7]. Один из методов – автоматизированные экспертные системы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [8, 9].

Цель настоящей работы – создание статистической модели классификации осадков и снегопадов на лавино- и нелавиноопасные. Это необходимо для улучшения качества прогноза

лавин, так как обильные и интенсивные осадки и снегопады представляют собой основные факторы лавинообразования в горах Иле Алатау. Интересно проверить и возможности программ искусственного интеллекта для решения задач прогнозирования и классификации лавинной опасности. В дальнейшем планируется перейти на вероятностный прогноз с применением международной пятибалльной шкалы лавинной опасности.

Методика исследований

После изучения литературы мы выбрали два статистических метода: 1) автоматизированные экспертные системы на базе искусственных нейронных сетей (ИНС); 2) метод линейной дискриминантной функции (каноничный дискриминант Фишера). Для экспериментов использовалось стандартное программное обеспечение. Дискриминантная функция рассчитывалась в программе Statistica 6.0 от компании StatSoft. Это – полностью русскоязычный пакет, позволяющий провести любые расчёты по математической статистике [10]. Искусственная нейронная сеть построена с помощью учебного нейросимулятора, разработанного Л.Н. Ясницким и Ф.М. Черепановым из Пермской школы искусственного интеллекта при Пермском государственном гуманитарно-педагогическом университете [11, 12].

Были проведены сбор, анализ и первичная обработка материалов многолетних наблюдений за погодой и лавинами в бассейне р. Киши Алматы в районе снеголавинной станции (СЛС) «Шымбулак». Эта СЛС расположена в 25 км от г. Алматы на высоте 2170 м над ур. моря (все высоты в статье даны над уровнем моря) и представляет собой одну из старейших станций в Казахстане. Она организована в 1966 г. после экстремально снежной зимы 1965/66 г. Наблюдения здесь ведутся более 40 лет, но в 1990-е годы она несколько лет не работала из-за кризиса. Учитывались только лавины, связанные с осадками и снегопадами. Типы и режим лавин здесь характерны для всего северного склона хр. Иле Алатау. Этот район можно считать научным полигоном по изучению лавин в Казахстане. Дополнительно взяты данные об осадках на

метеорологической станции (ГМС) «Мынжылки», расположенной на высоте 3017 м в этом же ущелье. Это необходимо, чтобы отличать осадки, прошедшие во всех высотных зонах.

Основные факторы лавинообразования

СЛС Шымбулак обеспечивает прогноз лавин для среднегорной зоны долины Малой Алматинки (р. Киши Алматы) от 1600 до 3000 м. Здесь расположены горнолыжный курорт Шымбулак, каток Медеу, проходит автомобильная дорога Медеу – Шымбулак – Ворота Туюксу. Данная территория активно посещается туристами. Лавиноопасный сезон в среднегорной части Иле Алатау продолжается с декабря по апрель. Выше 3000 м лавиноопасный сезон более продолжительный, а в гляциальной зоне выше 3500 м лавины могут сходить весь год, однако эта территория не входит в зону ответственности снеголавинной станции, поэтому прогнозы лавин для высокогорной зоны не составляются.

Снежный покров толщиной более 30 см, достаточный для лавинообразования в районе СЛС Шымбулак, устанавливается в начале декабря. После обильных декабрьских снегопадов толщина снежного покрова достигает 50–70 см. В январе и феврале наступает длительный период с морозной погодой и редкими небольшими снегопадами. В это время в нижней части снежной толщи формируется слой перекристаллизованного слабосвязанного снега («глубинная изморозь»), который часто служит поверхностью отрыва лавин. В марте, особенно в его второй половине, начинаются обильные снегопады, перемежающиеся с оттепелями. Толщина снежного покрова достигает 110–130 см, а в многоснежные годы, повторяющиеся один раз в 10–12 лет, – 150 см.

Долина р. Малая Алматинка в среднегорной части имеет V-образный поперечный профиль. Превышение склонов над дном долины в среднем составляет 600–800 м, местами достигая 1000–1100 м. Склоны северной, западной и восточной экспозиций до высоты 2800 м заняты густым лесом из тянь-шаньской ели. Склоны южной экспозиции и склоны, поднимающиеся выше 2800 м, покрыты травянистой

растительностью. В районе наблюдений СЛС преобладают лотковые лавинные очаги. Высота падения лавин достигает 1000 м. Площадь лавиносборов составляет от 1 до 50 га, а крутизна склонов в зоне отрыва лавин — 30–35°. Нижняя граница зоны формирования лавин проходит на высоте около 2000 м. Нижняя граница, которой достигают лавины, равна 1600 м. Наибольшая лавинная активность наблюдается на склонах выше 2500 м, имеющих северную, северо-восточную и северо-западную экспозиции. Меньше активность — на склонах восточной и западной экспозиций. На склонах южной экспозиции в среднегорной зоне хр. Иле Алатау лавины не образуются из-за отсутствия постоянного снежного покрова. Средний объём лавин составляет около 10 тыс. м³. Максимальный из зарегистрированных на СЛС объёмов лавин равен 350 тыс. м³. Все показатели лавинной активности (количество, объёмы, число дней с лавинами) характеризуются большой межгодовой изменчивостью [13]. При этом достоверных временных трендов не установлено. В 60% случаев годы с высокой лавинной активностью совпадают с годами с высокой снежностью. Однако, кроме количества снега, на лавинную активность значительно влияют и другие факторы лавинообразования: режим выпадения осадков, температура воздуха, процессы перекристаллизации снега.

В течение зимы наблюдаются два пика лавинной активности: в конце декабря — начале января и в марте — начале апреля. В начале зимы сходят сухие лавины из свежеснежного покрова, в конце зимы преобладают мокрые лавины из старого снега. Всего за зиму бывает от 10 до 40 дней с лавинами. По количеству преобладают сухие лавины, а по объёмам и разрушительной силе — мокрые лавины. В условиях континентального климата в предгорьях Иле Алатау выпадает около 600 мм осадков в год, а в высокогорной зоне — около 1000 мм. В среднем за лавиноопасный период отмечается 20–30 случаев выпадения осадков и снегопадов, но большинство из них нелавиноопасные — 1–5 мм. Сильные лавиноопасные осадки (20–30 мм/сут.) отмечаются 1–3 раза за лавиноопасный период. Экстремальные осадки (30–50 мм/сут.) наблюдаются один раз в 5–10 лет и вызывают массовый сход лавин. Сход катастро-

фических лавин отмечается ещё реже, так как для этого необходимо сочетание многих факторов — экстремальных осадков, неустойчивости снежного покрова и соответствующего температурного режима. Большинство сильных осадков имеет продолжительность 1–1,5 сут.

Все параметры (предикторы), входящие в модель, давно используются при прогнозировании лавинной опасности в Иле Алатау. Основные предикторы в методах И.В. Кондрашова и Е.И. Колесникова — количество осадков (прирост снега) и толщина старого снега на СЛС Шымбулак. Однако для разделения осадков на лавино- и нелавиноопасные опытный прогнозист учитывает и другие факторы: снежную обстановку в предыдущие сутки, интенсивность осадков, снегозапас в шурфе и осадки на соседней ГМС Мынжылки. Поэтому было решено включить дополнительные данные для более точного разделения осадков и снегопадов. В планах работы — обучить искусственные нейронные сети на тех же данных, что используют прогнозисты-лавинщики. В результате испытаний модели, вероятно, будут оставлены самые информативные данные.

При экспериментальном методе прогноза использованы входные и выходные сигналы. Входные сигналы (предикторы) — срочные данные наблюдений на метеоплощадке в 9.00 ч. (местное время) и на стационарном шурфе в 15.00 ч. (местное время). Текущие осадки и толщина снега измерялись непосредственно перед сходом лавин. Прирост снега фиксировался с помощью специальных переносных реек. Интенсивность осадков и прироста снега не измерялась, а вычислялась. Методы наблюдения стандартные, описанные в руководствах [3, 4]. Период наблюдений — 1984–2015 гг. Список предикторов приведён далее.

Входные сигналы:

- x_1 — количество осадков на метеоплощадке за предыдущие сутки, мм;
- x_2 — количество осадков на метеоплощадке непосредственно перед сходом лавин, мм;
- x_3 — количество осадков на ГМС Мынжылки за предыдущие сутки, мм;
- x_4 — толщина снега в стационарном шурфе за предыдущие сутки, см;
- x_5 — толщина снега в стационарном шурфе в день схода лавин, см;

x_6 – прирост снега за весь период осадков, см;
 x_7 – интенсивность осадков, мм/ч;
 x_8 – интенсивность прироста толщины снега, см/ч;
 x_9 – общий снегозапас в стационарном шурфе в день схода лавин, мм.

Выходные сигналы – сведения о сходе лавин в центральной части бассейна р. Киши Алматы (Малая Алматинка) зоне наблюдений СЛС Шымбулак.

Выходной сигнал:

y_1 – класс снегопада: 0 – нелавиноопасные осадки и снегопады; 1 – лавиноопасные осадки и снегопады.

В качестве обучающей выборки использовался ряд из 4285 дней, из них 192 дня – со сходом лавин. В качестве тестовой выборки взяты две зимы – 2013/14 и 2014/15 гг. – 374 дня, из них 15 дней со сходом лавин. Оправдываемость прогноза Кондрашова (90%) обеспечивается в значительной степени опытностью наблюдателя. Как уже отмечалось, в настоящее время опытных наблюдателей почти не осталось и качество прогнозов ухудшилось. Часто даются перестраховочные прогнозы, что ещё раз подчёркивает необходимость модернизации методов прогноза.

Результаты исследований

Дискриминантная функция. В статистике для решения задач классификации используется линейная дискриминантная функция (каноничный дискриминант Фишера) [10]. Он применяется только в том случае, когда заранее известны классы переменных. Дискриминантная функция записывается в виде формулы (1):

$$D = a + b_1x_1 + \dots + b_nx_n, \quad (1)$$

где D – линейная дискриминантная функция; a – постоянный коэффициент; b_1, b_n – дискриминантные коэффициенты; x_1, x_n – переменные (предикторы).

Значения коэффициентов a и b определяют с помощью ковариационной матрицы. После обработки данных о погоде и состоянии снега (входных сигналов, приведённых выше) в программе Statistica 6.0 получена итоговая формула (2) и значение дискриминантной функции для каждого класса осадков:

$$D = 0,0061x_1 + 0,1003x_2 + 0,0055x_3 + 0,0040x_4 + 0,0019x_5 + 0,1211x_6 + 0,07168x_7 + 0,0960x_8 - 0,0006x_9 - 0,6060, \quad (2)$$

где среднее значение $D = -0,2490$ для нелавиноопасных осадков; среднее значение $D = 5,3073$ для лавиноопасных осадков.

Для удобства работы и проверки результатов формула (2) перенесена в программу Excel. Для определения класса опасности снегопада написана логическая формула «если» (3):

если $D > 2,5292$, то $y_1 = 1$ (лавиноопасные осадки);
 если $D < 2,5291$, то $y_1 = 0$ (нелавиноопасные осадки). (3)

Были рассчитаны значения D и y_1 для тестовой выборки. Сравнение полученных результатов и наблюденных показало хорошую работу статистической модели. Всего из 374 дней были правильно распознаны 358, или 96% (16 ошибочных классификаций). Из 15 дней с лавинами были распознаны 14, или 93%. Наиболее часто встречающаяся ошибка – отнесение нелавиноопасной ситуации к лавиноопасной – 14 случаев.

Искусственные нейронные сети (ИНС). Модели ИНС созданы для описания работы головного мозга, но получили широкое распространение в математике, физике, программировании и статистике. Нейросимулятор моделирует работу нервных клеток. Каждый нейрон имеет вход – синапс и выход – аксон. Количество нейронных связей может достигать миллиардов. Текущее состояние нейрона описывается формулой (4):

$$u_i = \sum_{j=1}^N w(i, j)x(j) + b(j), \quad (4)$$

где $x(j)$ – входной сигнал; $w(i, j)$ – вес входного сигнала (синапс); $b(i)$ – порог активации нейрона; u_i – текущее состояние нейрона (аксон).

Модель искусственного нейрона приведена на рис. 1 [11]. Функция активации необходима для преобразования входного сигнала в выходной. Самая распространённая сигмоидальная функция описывается формулой (5):

$$f(x) = 1/1 + \exp(-ax). \quad (5)$$

Многослойный персептрон (от англ. perception – чувствительность) – самый распространённый тип сети. Преобразование входных сигналов в выходной происходит в ходе многократного суммирования в каждом из искусственных нейронов. Существует различная ар-

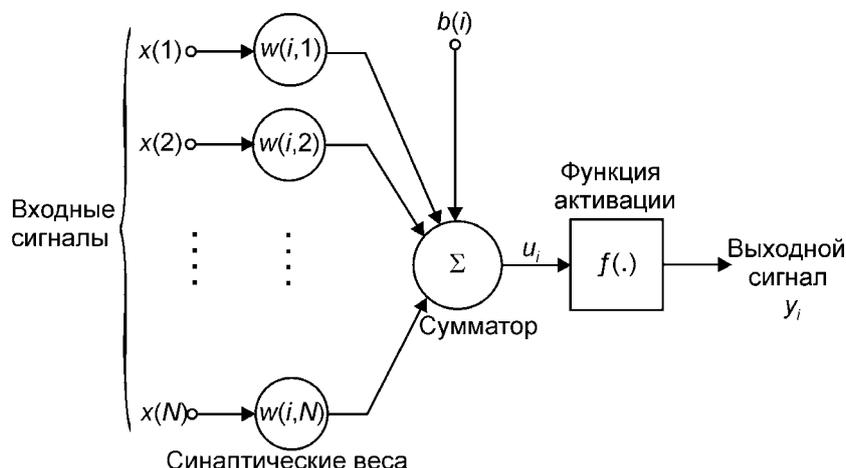


Рис. 1. Модель искусственного нейрона

Fig. 1. Model of artificial neuron

хитектура сети с одним входным и выходным слоем и несколькими скрытыми слоями. В слое может быть неограниченное количество нейронов. Многослойные перцептроны обучаются, когда известны значения выходного сигнала. В противном случае необходимо использовать совершенно другой тип сети – самоорганизующиеся сети Кохонена. В качестве экспериментального был выбран бесплатный обучающий нейросимулятор Л.Н. Ясницкого и Ф.М. Черепанова [12, 14].

Для обработки взяты те же самые данные, что и в предыдущей модели. Была построена нейронная сеть, соответствующая входным и выходным сигналам (девять входных нейронов, один выходной нейрон, четыре скрытых слоя по 99 нейронов). Принципиальная схема построенной ИНС приведена на рис. 2. Данные, полученные нейронной сетью, были перенесены в программу Excel для проверки. Сравнение по-

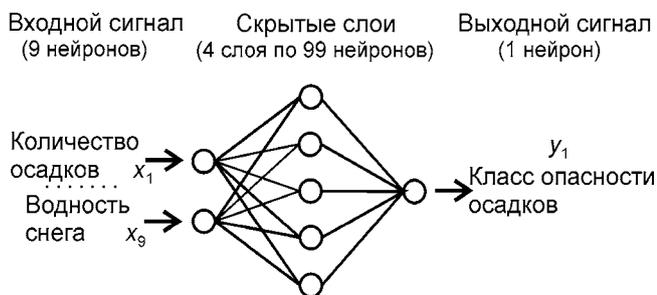


Рис. 2. Принципиальная схема искусственной нейронной сети

Fig. 2. The schematic diagram of neural network

лученных результатов и наблюдаемых показало хорошую работу модели. Всего из 374 дней были правильно распознаны 366, или 98% (8 ошибочных классификаций). Из 15 дней с лавинами были распознаны 13, или 87%.

Обсуждение результатов

Предлагаемая «экспертная система» на основе искусственных нейронных сетей должна помочь лавинщику-прогнозисту в классификации осадков и снегопадов. Если текущая снеголавинная обстановка относится к лавноопасному классу и осадки продолжают, то прогнозист должен составить «Штормовое предупреждение». Заблаговременность подобных методов прогноза небольшая – несколько часов, но оправдываемость их гораздо выше. А этих нескольких часов хватает для принятия необходимых мер. Для увеличения заблаговременности прогноза в дальнейшем возможно включение в программу прогностических сумм осадков, полученных в результате новых численных моделей прогноза погоды Казгидромета или Росгидромета.

Как уже отмечалось, в снеголавинной службе Казахстана, как и в большинстве стран СНГ, используют стандартные методы оценки качества прогнозов [3, 15]. Существуют несколько критериев оценки прогнозов и «Штормовых предупреждений»: общая оправдываемость прогнозов; оправдываемость «Штормовых предупрежде-

Критерии оценки качества прогнозов лавин по различным методам

Прогностический метод	Общая оправдываемость прогнозов, %	Оправдываемость штормовых предупреждений, %	Критерий Багрова
Прогнозы СЛС Шымбулак за период 2006–2014 гг.	79	35	0,35
Дискриминантный анализ	96	50	0,5
Искусственные нейронные сети	98	59	0,59

ний»; критерии Багрова–Обухова. Проверка моделей была выполнена на независимом материале. В качестве тестовой выборки взяты две зимы 2013/14 и 2014/15 гг. – 374 дня, из них 15 дней со сходом лавин. Сравнение оправдываемости прогнозов СЛС Шымбулак и потенциальной оправдываемости по предлагаемым моделям приведено в таблице.

Невысокая оправдываемость прогнозов СЛС Шымбулак объясняется человеческим фактором. Большое количество ложных прогнозов составляет для подстраховки. Кроме того, трудно прогнозируются другие типы лавин, но величина критерия Багрова, равная 0,35, укладывается в стандартные нормативы качества, принятые со времён СССР. При значении критерия Багрова ниже 0,33 качество прогнозов считается неудовлетворительным. Проверка предлагаемых моделей показала оправдываемость выше среднестатистической. Учитывая это, модели классификации осадков можно рекомендовать для проведения производственных испытаний. Только после них можно делать выводы о работоспособности модели.

У каждой прогностической модели есть свои особенности. Дискриминантная функция проста в использовании, но для разделения осадков применяется линейный метод. Её рекомендуют использовать, если наблюдается прямая зависимость между входными и выходными данными с высоким уровнем корреляции (линейная корреляция Пирсона). Это приводит к тому, что плохо учитывается критическая величина осадков при небольшой толщине старого снега. Модели на основе искусственного интеллекта рекомендуется применять, когда между входными (предикторы) и выходными данными наблюдаются нелинейные зависимости с невысоким уровнем корреляции [11]. Кроме того, модель легче переобучить при поступлении свежих данных, хотя интерфейс нейросимулятора – более сложный в работе.

Для дальнейшего улучшения методов прогнозирования лавинной опасности необходимо применять мировой опыт и переходить на вероятностные формы прогноза. Сейчас для этого существует Международная пятибалльная шкала лавинной опасности, созданная в Швейцарском федеральном институте изучения снега и лавин. По этой шкале вероятность схода лавин меняется от низкого «зелёного» уровня угрозы до экстремального «красного». Использование ИНС позволяет определять и степень лавинной опасности. В этом случае входными сигналами будет информация о погоде и снежной обстановке, а выходными сигналами – пять степеней лавинной опасности.

Заключение

Обе статистические модели можно рекомендовать для экспериментального прогнозирования лавин. Они показали хорошую точность классификации и способны облегчить работу по распознаванию лавиноопасных осадков. Лавиноопасные осадки – основной фактор лавинообразования в горах Иле Алатау. Это необходимо знать всем специалистам. Настоящую работоспособность модели можно определить только в результате производственных испытаний. Следующим этапом работы станет применение этих моделей для определения степени лавинной опасности по Международной пятибалльной шкале, что позволит перейти от категорических (альтернативных) форм прогноза к вероятностным.

Благодарности. Автор выражает благодарность В.П. Благовещенскому за помощь в написании статьи. Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Г. 2015 2306/ГФ4 Министерства образования и науки Республики Казахстан («Определение границ лавиноопас-

ных зон в горных районах Казахстана с применением компьютерного моделирования»).

Acknowledgments. Author cordially thanks Viktor Blagoveshensky for his help in writing this article. The

work was performed in framework of a grant funding G. 2015 2306/GF4 by Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Delimitation of the avalanche-dangerous zones in mountainous regions of Kazakhstan by means of the computer modeling).

Литература

References

1. Кондрашов И.В. Прогноз лавин и некоторых характеристик снежности в горах Казахстана. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 72 с.
2. Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности в Казахстане / Под ред. Е.И. Колесникова. Алматы: изд. РГП «Казгидромет», 2005. 262 с.
3. Руководство по снеголавинным работам. Алматы: изд. РГП «Казгидромет», 2006. 262 с.
4. Руководство по снеголавинным работам (временное). Л.: Гидрометеиздат, 1965. 397 с.
5. Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 200 с.
6. Черноус П.А. Применение многомерного дискриминантного анализа для распознавания лавиноопасных ситуаций // Исследование снега и лавин в Хибинах. Л.: Гидрометеиздат, 1975. С. 64–70.
7. Марченко Е.С. Пространственная оценка устойчивости снежного покрова для определения возможности схода лавин разных генетических типов: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2013. 24 с.
8. Schweizer J., Jamieson J.B., Skjonsberg D. Avalanche forecasting for transportation corridor and backcountry in Glacier National Park (BC, Canada). Oslo, NGI, 1998. Publ. № 203. P. 238–244.
9. Stephens J., Adams E., Huo X., Dent J., Hicks J., McCarty D. Use of neural networks in avalanche hazard forecasting. ISSW'98. URL: <http://www.issw.noaa.gov/hourly%20agenda.htm>.
10. Боровиков В.П. Искусство анализа данных на компьютере. М.: Питер, 2003. 688 с.
11. Нейронные сети: методология и технологии современного анализа данных / Под ред. В.П. Боровикова. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 392 с.
12. Черепанов Ф.М., Ясницкий Л.Н. Исследовательский симулятор нейронных сетей // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации: материалы Пятой Всерос.
1. Kondrashov I.V. *Prognoz lavin i nekotorykh kharakteristik snezhnosti v gorakh Kazakhstana*. The forecast of avalanches and some characteristics of snowiness in the mountains of Kazakhstan. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991: 72 p. [In Russian].
2. *Prakticheskoe posobie po prognozirovaniyu lavinnoy opasnosti v Kazakhstane*. Practical guide to forecasting avalanche danger in Kazakhstan. Ed. by E.I. Kolesnikov. Almaty: Publishing House of Hydrometeorology Service of Kazakhstan, 2005: 262 p. [In Russian].
3. *Rukovodstvo po snegolavinnyim rabotam*. Guide to snow-avalanche works. Almaty: Publishing House of Hydrometeorology Service of Kazakhstan, 2006: 262 p. [In Russian].
4. *Rukovodstvo po snegolavinnyim rabotam (vremennoe)*. Guide to snow-avalanche works (temporary). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965: 397 p. [In Russian].
5. *Prakticheskoe posobie po prognozirovaniyu lavinnoy opasnosti*. Practical guide to forecasting avalanche danger. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979: 200 p. [In Russian].
6. Chernous P.A. The use of multivariate discriminant analysis to recognize avalanche situations. *Issledovaniya snega i lavin v Khibinakh*. Study of snow and avalanches in Khibiny. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975: 64–70. [In Russian].
7. Marchenko E.S. *Prostranstvennaya otsenka ustoychivosti snegolavinnogo pokrova dlya opredeleniya vozmozhnosti skhoda lavin raznykh geneticheskikh tipov*. Spatial evaluation of the stability of snow cover to determine the possibility of avalanches of different genetic types. PhD thesis. Lomonosov Moscow State University, 2013: 24 p. [In Russian].
8. Schweizer J., Jamieson J.B., Skjonsberg D. Avalanche Forecasting for Transportation Corridor and Backcountry in Glacier National Park (BC, Canada). Oslo, NGI, 1998, Publ. 203: 238–244.
9. Stephens J., Adams E., Huo X., Dent J., Hicks J., McCarty D. Use of neural networks in avalanche hazard forecasting. ISSW'98. URL: <http://www.issw.noaa.gov/hourly%20agenda.htm>.
10. Borovikov V.P. *Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere*. Art of the analysis of data on the computer. Edition 2. Moscow: Publishing House «St. Petersburg», 2003: 688 p. [In Russian].
11. *Neyronnye seti: metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh*. Neural networks: methodology and technologies of the modern analysis of data / Ed. V.P. Borovikov. Moscow: Publishing House “Hot line-Telecom”, 2008: 392 p. [In Russian].
12. Cherepanov F.M., Yasnitsky L.N. Survey simulator of neural networks // Artificial intelligence: philosophy, methodology,

- конф., Москва, МГТУ МИРЭА, 9–11 ноября 2011 г. М.: Радио и Связь, 2011. С. 137–139.
13. *Благовещенский В.П., Жданов В.В., Аскарбеков Б.Б.* Межгодовая изменчивость снежного покрова и лавинной активности // Вопросы географии и геоэкологии. 2015. № 1. С. 78–80.
 14. *Черепанов Ф.М.* Исследовательский симулятор нейронных сетей, обзор его приложений и возможности применения для создания системы диагностики заболеваний сердечнососудистой системы // Современ. проблемы науки и образования. 2013. № 1. URL: www.science-education.ru/107-8392
 15. Методические указания по прогнозированию лавин и снеголавинному обеспечению в Казахстане / Под ред. Е.И. Колесникова. Алматы: изд. РГП «Казгидромет», 2003. 43 с.
 - innovations: materials of the Fifth All-Russian conf., Moscow, MGTU of MIREA, on November 9–11, 2011. Moscow: Publishing House “Radio and Communication”, 2011: 137–139. [In Russian].
 13. *Blagoveshenskiy V.P., Zhdanov V.V., Askarbekov B.B.* The interannual variability of snowpack and avalanche activity. *Voprosy geografii i geoekologii*. Problems of geography and geoeology. 2015, 1: 78–80. [In Russian].
 14. *Cherepanov F.M.* Survey simulator of neural networks, review of its appendices and possibility of application for creation of system of diagnosis of diseases of cardiovascular system. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. Modern problems of science and education. 2013, 1. URL: www.science-education.ru/107-8392. [In Russian].
 15. *Metodicheskie ukazaniya po prognozirovaniyu lavin I snegolavinnomu obespecheniyu v Kazakhstane*. Methodical instructions on forecasting of avalanches and snow-avalanche providing in Kazakhstan. Ed. E.I. Kolesnikov. Almaty: Publishing House of Hydrometeorology Service of Kazakhstan, 2003: 43 p. [In Russian].