

Научная статья / Original research article
УДК 519.853
DOI:10.31660/0445-0108-2025-4-100-114
EDN: PUCNUT



**Цифровая модель прогнозирования снеготранспортируемости транспортных
магистралей на территории субарктической зоны**

И. С. Беляев¹, О. П. Рысева¹, В. А. Громов¹, В. А. Ружьев², С. П. Пирогов^{*3}

¹Заполярный государственный университет имени Н. М. Федоровского, Норильск, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

*pirogovsp@tyuiu.ru

Аннотация. Статья посвящена направлению в инженерной геодинамике — снеговетровым процессам и влиянию их последствий на эффективность инженерно-хозяйственного освоения арктических регионов России. Снежные отложения рассматриваются как аналог грунта эолового генезиса — многокомпонентной динамичной системы, а экстремальные формы снежного покрова, так называемые «снежные заносы» — как результат инженерной деятельности человека. Для разработки методики оценки объемов выпавшего снега использовались официальные данные, полученные с метеостанций. Общий подход к расчетам основан на непосредственных измерениях объемов снеготранспортировки. Основные методические принципы заключаются в концептуальном анализе снеговетровых процессов, расцениваемых как геологическая деятельность ветра, следовательно, снеготранспортируемость объектов интерпретируется как инженерно-геологический процесс, а снежные отложения — как аналог грунтов эолового генезиса. Исследования снеговетровых процессов базируются на постулатах инженерной геодинамики, аэродинамики, информационных данных, математических аппаратах и опыте эксплуатации транспортных систем в суровых северных условиях и являются наиболее достоверными. В работе проведено геодинамическое районирование территории по факторам, которые классифицируют сформированные отложения снега. Для обеспечения безопасной эксплуатации транспортных и транспортно-технологических машин и комплексов на транспортных магистралях, жизнеобеспечения жителей и производственного цикла предприятий Норильского района предложена прогнозная цифровая модель снеготранспортируемости автодороги Норильск — Талнах, отражающая закономерности формирования снеготранспортировок на автодорогах в условиях города, расположенного в субарктической зоне Российской Федерации. Разработанная цифровая прогнозная модель предназначена для поддержания работоспособного состояния гражданской и военной инфраструктуры, расположенной в районах со сложными климатическими условиями за счет достоверных прогнозов снеготранспортируемости, позволяющих определить количество снега на конкретных участках автомагистралей за любой период времени.

Ключевые слова: снеготранспортировка, цифровая модель, автомагистраль, прогнозирование, мониторинг, геодинамика, снегоуборка

Для цитирования: Цифровая модель прогнозирования снеготранспортируемости транспортных магистралей на территории субарктической зоны. И. С. Беляев, О. П. Рысева, В. А. Громов [и др.]. — DOI 10.31660/0445-0108-2025-4-100-114 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2025. — № 4. — С. 100–114. — EDN: PUCNUT

**A digital forecasting model for snowdrifts extent
on transport routes in the subarctic zone**

S. Belyaev¹, O. P. Ryseva¹, V. A. Gromov³, V. A. Ruzhev², C. P. Pirogov³

¹N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia

²St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russia

³Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*pirogovsp@tyuiu.ru

Abstract. This paper presents a specific area within engineering geodynamics: the processes of snowdrift and their impact on the efficiency of engineering and economic development in the Arctic regions of Russia. Snow deposits are analogous to soil of aeolian genesis, representing complex and dynamic systems. Extreme forms of snow cover, commonly referred to as "snowdrifts", are partly induced by human engineering activities. The authors used data from official meteorological stations to estimate the volume of accumulated snow. The calculations build on direct measurements of snow transport volumes. The core methodological principles are grounded in a conceptual analysis of wind-driven snow processes, viewed as the geological functions of wind. As such, snowdrifts extent is treated as an engineering-geological process, and snow deposits are regarded as analogous to aeolian soils. The wind-driven snow processes study employs principles of engineering geodynamics, aerodynamics, information technologies, and mathematical tools, along with operational experience from northern transport systems, to ensure high reliability of the results. The authors conducted a geodynamic zoning of the territory, classifying different types of snow deposits based on various factors. The paper's authors proposed a digital forecasting model of snowdrifts extent on Norilsk–Talnakh highway. This model will serve to ensure the safe operation of vehicles, transport systems, and essential services for the population and industries in the Norilsk region. It reflects the patterns of snow deposits under urban subarctic conditions of Russian Federation. The model aims to support both civilian and military infrastructure in the harsh climate zones of Russia by providing reliable forecasts of snowdrifts extent. These forecasts facilitate the estimation of snow volume on specific highway sections over any given period.

Keywords: snow deposits, digital model, highway, forecasting, monitoring, geodynamics, snow removal

For citation: Belyaev, I. S., Ryseva, O. P., Gromov, V. A., Ruzhev, V. A., & Pirogov, C. P. (2025). A digital forecasting model for snowdrifts extent on transport routes in the subarctic zone. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 100-114. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-4-100-114

Введение

При освоении территории Норильского промышленного района одну из основных проблем, требующих постоянного внимания, составляли дороги, заносимые снегом в холодный период времени и разжиженные в теплый. Опыта проектирования и устройства транспортных магистралей за 69 параллелью у строителей не было. При возведении насыпей, как правило, нарушалось природное равновесие, выражавшееся в изменении режима стока грунтовых вод, температуры оснований, характера снегонакопления. Дороги приходилось очищать от снега для проезда транспорта по несколько раз за день. Как следствие — деформации дорожных конструкций. Норильский район является одним из наиболее значимых индустриальных и социально-развитых центров Арктики.

В связи с этим для борьбы со снежными заносами в 1942 году при Норильском комбинате была создана опытно-исследовательская станция, действовавшая до 1965 года включительно. Продолжение исследований снежных заносов началось в 1970-м, но в 1975-м исследования вновь были приостановлены. Зимой 1992–1993 годов количество выпавшего снега пре-

высило норму в три раза, поэтому в 1993-м было создано отделение гляциологии в геокриологической лаборатории Горно-металлургического опытно-исследовательского центра. В 1997 году отделение ликвидировали.

В настоящее время отсутствует единая теоретическая база, которая объединила бы опыт практической деятельности по предупреждению снежных заносов и ликвидации их последствий, а также научные исследования, проведенные в этой области знаний. Публикаций по проблеме недостаточно.

Снежные заносы, периодически возникающие на транспортных системах, улицах городов затрудняют движение всех видов транспорта, передвижение людей, доставку технологических грузов и продовольствия.

Важнейшей задачей в этом направлении является прогнозирование и предупреждение неблагоприятного воздействия естественных причин, происходящих в природе, на объекты, при этом прогноз должен даваться во времени и учитывать интенсивность уже существующих процессов.

Проблема своевременного прогнозирования снегозаносимости автодорог не потеряла своей актуальности и сейчас. Ученые Заполярного государственного университета имени Н. М. Федоровского, которые более 20 лет ведут исследования в этом направлении, опираясь на уникальный опыт знания предыдущих поколений исследователей, поставили целью разработать цифровую модель оценки и прогноза объемов снежных отложений на автодорогах. Такая модель предоставляет возможность оперативного мониторинга температурно-ветровых показателей в режиме онлайн из сертифицированных веб-источников и позволяет определить количество снега на конкретных участках автомагистралей за любой период времени.

В качестве главных методических позиций нового подхода снеговетровые процессы рассматриваются как геологическая деятельность ветра. Соответственно, снегозаносимость объектов представляется в качестве инженерно-геологического процесса, а снежные отложения — аналога грунтов эолового генезиса [1].

Объектом лонгитюдных исследований выбрана автомагистраль Норильск — Талнах, расположенная в городе Норильске Красноярского края, субарктической зоне Российской Федерации (РФ). Транспортные системы по совокупности природно-техногенных факторов характеризуются присущей им геодинамической обстановкой. К примеру, область, в которой находится трасса Талнах — Норильск, характеризуется наиболее активными криогенными процессами.

Снег — основной компонент снеговетрового процесса, а снежные отложения — наиболее очевидные проявления его последствий. При этом степень участия снега в снеговетровом потоке (поземки, метели и так далее) определяется его способностью перемещаться под действием ветра, которая, в свою очередь, зависит от свойств снега (плотность, прочность, степень метаморфизма и другое). Ветер — движущая сила, перемещающая

снег и определяющая его неравномерное по мощности и плотности распределение в пространстве. Транспортирующая способность ветра определяется его скоростью и ее изменениями в пространстве и времени [2].

Основные условия различных типов снеговетровых процессов формируются в зависимости от основных геологических условий.

Снегоперенос выпадающих атмосферных осадков. В верхних слоях воздуха перемещение частиц снежной массы осуществляется под действием геострофического ветра и силы тяжести. Частицы, попадая в деятельный слой, приобретают достаточно хаотичный характер движения. Часть их (в зависимости от форм и плотности) поднимается вверх, другая оседает на поверхности и закрепляется, третья — под действием касательных напряжений, тем самым «бомбардируя» снежный покров, в одних случаях уплотняя его, в других выбивая из него частицы снега, вступающие в последующую дефляцию [3].

Дефляция возникает при условии, когда снежный покров имеет плотность и прочность, недостаточные для сохранения равновесия под действием ветра. Это положение определяет новый подход в изучении снеговетровых процессов. Ранее это условие (I закон метелей) трактовалось по-иному, то есть метель начинается при определенной скорости ветра для данных условий. Из положений инженерной геодинамики следует, что снег — это среда, в которой формируется снеговетровой процесс, поэтому именно снежный покров должен иметь или приобрести такие свойства, при которых при данной скорости ветра он будет перемещаться [3].

Как отмечено выше, снеговетровые процессы делятся на *метели* (верховая, низовая) и *поземки*. Низовая метель более распространена в Арктике и имеет место при сочетании снегопада с метелевым снегопереносом при поднятии ветром значительных масс снега с поверхности. Низовая метель особенно опасна после снегопадов, когда снег еще не успел слежаться. После обильных снегопадов, когда выпадает сухой снег, поземка, особенно при сильных ветрах, становится весьма похожей на низовую метель. При поземках по лежалому снегу, когда поверхность снега имеет корку, объем снегопереноса незначителен и представляет движение частиц по плотному насту. По классификации А. К. Дюнина [4] на долю низовых метелей приходится до 80 % от всех разновидностей снеговетровых процессов Норильского района.

При поземках основным способом перемещения снежных частиц выступают качение, волочение и сальтация. Для этого в зависимости от состояния снежного покрова нужна скорость ветра до 3 м/с для свежевыпавшего сухого снега и более 5 м/с для затвердевшего лежалого снега, имеющего прочность более 0,1 МПа. Частицы снега в процессе перемещения поднимаются в воздух за счет подъемной силы, возникающей под действием порыва ветра, который создает местные локальные зоны завихрения. В этом случае волочение и перекачивание снежных частиц принимает скачкообразную форму перемещения (сальтация) [5, 6].

Таким образом, снег и снежные отложения являются многокомпонентной, весьма динамичной системой, в которой параметры всех ее составляющих компонентов находятся в постоянном изменении. Сухой снег, как аналог грунта, представляет собой двухфазную систему, а мокрый — трехфазную, состоящую из кристаллов льда, воды и воздуха.

В связи с этим при проведении исследований в области формирования снежных отложений при хозяйственной деятельности предлагается следующее определение снега: *снег* — это совокупность кристаллов льда, образовавшихся в особых, только им присущих климатических условиях, в виде многокомпонентной динамичной системы, изучаемой как объект инженерно-хозяйственной деятельности человека. Такое определение отражает генезис, особенности строения снега и изменчивость его свойств во времени, что в конечном итоге определяет специфику его физических, физико-механических и деформационных свойств [6].

Неустойчивый барический климат и сильно пересеченная местность обуславливают непостоянство ветрового режима на территории района [7].

При скорости ветра более 5 м/с возникает поземок, представляющий собой струйки снега, перемещающиеся по поверхности земли. Когда скорость ветра достигает 10–12 м/с, то начинается низовая метель. Если же скорость ветра превышает 15 м/с, то это создает серьезные препятствия для работы и передвижения людей на открытом воздухе.

Продолжительность метелей может варьироваться от нескольких часов до 2–4 суток, а иногда и дольше — до 10–12 суток и более.

Рассматриваемая территория относится к тундровому типу ландшафтов, который включает три подтипа: моховые и лишайниковые тундры, кустарниковые тундры и лесотундры. Моховые и лишайниковые тундры преимущественно встречаются в горной части района, тогда как кустарниковые тундры и лесотундры распространены в равнинной местности, а также в котлованах крупных озер [8].

Наиболее распространенной формой представления геодинамической обстановки территории являются картографические модели, построением которых завершаются исследования геологических процессов и явлений. Они представляют собой метод визуализации полученных данных в форме, пригодной для применения в процессе проектирования и строительства, а также для быстрого принятия решений в чрезвычайных ситуациях. Поскольку образование снежных заносов определяется как инженерно-геологический процесс, соответствующие модели называются инженерно-геодинамическими. Эти модели отображают совокупность природных и техногенных факторов и их влияние на формирование геодинамической обстановки исследуемого района [9].

Была создана инженерно-геодинамическая карта, отражающая условия формирования снежных заносов. Она основана на геодинамическом районировании территории Норильского района. При составлении карты учитывались как природные, так и техногенные факторы.

К природным факторам относятся:

- климатические условия;
- степень расчлененности рельефа местности;
- характер растительного покрова.

Техногенными факторами являются:

- расположение дороги по отношению к направлению преобладающих ветров;
- конструкция дорожного полотна [9].

Прогностическая модель имеет форму таблицы с решетчатой структурой, где параметры природных факторов расположены в вертикальных столбцах, а техногенных — в горизонтальных строках. На пересечении этих параметров посредством балльной оценки анализируется совместное воздействие природных и техногенных факторов, что позволяет определить уровень риска возникновения снежных заносов.

В представленной модели степень риска снежных заносов оценивается последовательным сложением баллов. По набранным баллам установлены соответствующие категории степени риска снежных заносов (таблица).

Категории степени риска снежных заносов

№ п/п	Категория рисков	Сумма баллов
1	Очень высокая	Более 26
2	Высокая	17–26
3	Умеренная	11–16
4	Низкая	8–10
5	Очень низкая	Менее 8

На карте риска снежных заносов участки различной степени заносимости снегом выделяются крапом — с увеличением степени риска его густота увеличивается — или цветом.

В рамках работ по обеспечению безопасности на определенном участке дороги проводится геоморфологическое исследование территории.

В зависимости от величины уклона местность может быть классифицирована следующим образом:

- равнина (уклон не более 8°);
- пологий склон (уклон от 8 до 25°);
- крутой склон (свыше 25°).

Далее склоны, в зависимости от их ориентации по отношению к преобладающим метелевым ветрам, подразделяются на две категории: *подветренные* и *наветренные*.

Таким образом, территория, по которой проходит дорога, может быть разделена на пять участков с различными природными условиями

формирования снежных отложений. Это подтверждается многолетними наблюдениями и испытаниями.

Автомобильные дороги района по снегозаносимости делятся на пять категорий по известной методике оценки [10–15]: *незаносимые; слабой заносимости; средней; сильной заносимости; сплошной заносимости.*

Транспортная сеть Норильск — Талнах по совокупности природно-техногенных факторов характеризуется как озерно-аллювиальная равнина.

Анализ уровня заносимости снегом позволяет классифицировать автодорогу Норильск — Талнах как объект со слабой и средней степенью заносимости, что подразумевает относительно низкий риск возникновения снежных заносов.

Цифровая технологическая модель прогнозирования снегозаносимости автотранспортных магистралей сформирована на основе математических зависимостей, разработанных с учетом банка данных натурных изысканий, обработка которых проводилась методами теории вероятностей и математической статистики. Лабораторные испытания базировались на разработке трех моделей: механической, интерактивной и цифровой. Применение современных веб-технологий позволило использовать объемы данных, полученных в результате исследований, для получения постоянно действующей цифровой модели (рис. 1).

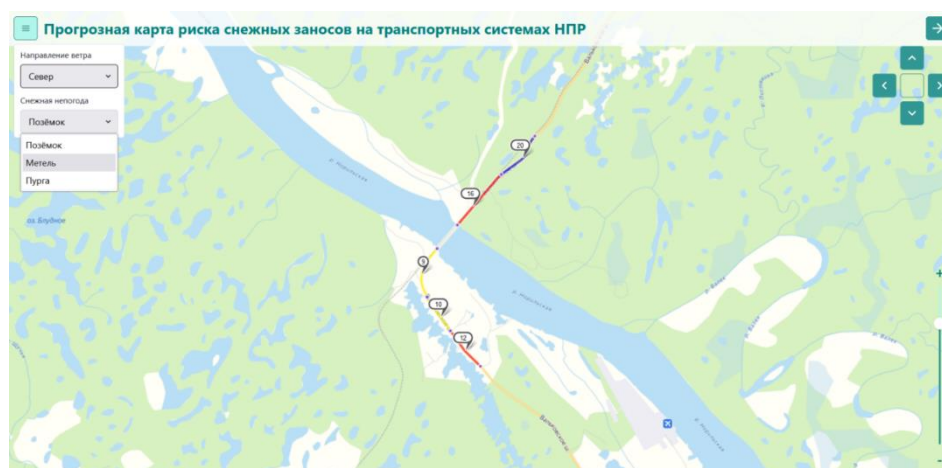


Рис. 1. Прогнозная карта риска снежных заносов на транспортной магистрали Норильск — Талнах

Этот тип модели имеет прикладную функцию оценки и может быть применен при планировании масштабных мероприятий по снегозащите, а также в процессе разработки транспортных схем на региональном уровне.

Обоснованы пять степеней риска снежных заносов: очень высокая, высокая, умеренная, низкая, очень низкая. Проведено оценочно-прогнозное районирование дорог Норильского промышленного района.

Трасса разбита на минимально возможные участки (секторы) с аналогичным рельефом и одинаковой ориентировкой оси полотна дороги по отношению к северному направлению.

Участки магистрали разделены на 4 группы:

- 1) ось дороги северо-западного и юго-восточного направлений;
- 2) ось дороги северного и южного направлений;
- 3) ось дороги северо-восточного и юго-западного направлений;
- 4) ось дороги западного и восточного направлений.

По цветовой окраске магистрали определяется степень риска снежного заноса того или иного участка и выдаются соответствующие распоряжения и рекомендации. В дополнение к цветовой окраске участка на экран выводится количество набранных им баллов.

Для разработки методики оценки объемов выпавшего снега использовались официальные данные с метеостанций Норильского района.

Методика определения объемов снежных наносов на заданной территории базируется на данных, полученных путем прямых измерений снегопереноса с использованием метелемеров, которые проводились в рассматриваемом регионе в разные годы. В общем виде объем снега (Q), выпадающего на объект, определяется по следующей формуле:

$$Q = f(q, d),$$

где q — количество выпавших осадков по данным метеостанции за определенный промежуток времени; d — дефляционный снег (принесенный ветром).

Мощность выпавшего снега определим по выражению:

$$H = \frac{q}{g * d * 10^{-3}},$$

где q — количество жидких осадков, мм; g — плотность снега, т/м³; d — плотность воды, т/м³.

Соответственно, объем выпавшего снега составит

$$V = S * h,$$

где S — площадь объекта, м².

На основе натурных исследований были разработаны алгоритмы прогнозирования снегозаносимости дороги. Эти алгоритмы стали основой для создания архитектуры веб-приложения, предназначенного для оперативного мониторинга и прогнозирования снежных отложений. На рисунке 2 представлена информация прогнозирования в табличной форме, которая выдается цифровой моделью каждый час. Форма для пользователя весьма неудобная.

```

{
  "InfestationForecast": [
    { "wind_kph": 41.8, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 40, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 39.2, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 36.7, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 34.6, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 28.4, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 25.9, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    { "wind_kph": 24.1, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [16, 14, 13, 20, 24] },
    { "wind_kph": 23.8, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [16, 14, 13, 20, 24] },
    { "wind_kph": 25.2, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [20, 18, 17, 24, 28] },
    {
      "wind_kph": 29.2,
      "wind_dir": "Юго-Запад",
      "forecast": [21, 17, 16, 25, 29]
    },
    { "wind_kph": 33.1, "wind_dir": "Запад", "forecast": [22, 18, 15, 24, 28] },
    { "wind_kph": 33.5, "wind_dir": "Запад", "forecast": [22, 18, 15, 24, 28] },
    { "wind_kph": 34.2, "wind_dir": "Запад", "forecast": [22, 18, 15, 24, 28] },
    { "wind_kph": 32.4, "wind_dir": "Запад", "forecast": [22, 18, 15, 24, 28] },
    { "wind_kph": 29.2, "wind_dir": "Запад", "forecast": [22, 18, 15, 24, 28] },
    { "wind_kph": 21.6, "wind_dir": "Запад", "forecast": [18, 14, 11, 20, 20] },
    {
      "wind_kph": 12.6,
      "wind_dir": "Юго-Запад",
      "forecast": [13, 9, 8, 17, 21]
    },
    { "wind_kph": 9.4, "wind_dir": "ЮГ", "forecast": [12, 10, 9, 16,

```

**Рис. 2. Почасовая информация снеготаносимости
за 04.12.2024 на 1 час ночи, где Wind_kph — скорость ветра,
Forecast — заносимость по всем участкам**

Трёхкомпонентная архитектура приложения включает (см. рис. 3):

- клиентскую часть (Frontend): Frontend обеспечивает взаимодействие с пользователем, используя API для получения данных и интеграции с Яндекс. Картами для отображения географической информации;
- серверную часть (Backend): Backend обрабатывает запросы от клиента, управляет бизнес-логикой и взаимодействует с базой данных посредством RESTful API;
- базу данных.

База данных, построенная на основе ER-модели, обеспечивает структурированное хранение данных и поддерживает их целостность. Таким образом, переход от исследований и разработки алгоритмов к созданию архитектуры веб-приложения позволил интегрировать научные достижения

в практическое решение для повышения безопасности и эффективности управления транспортными системами в сложных климатических условиях.

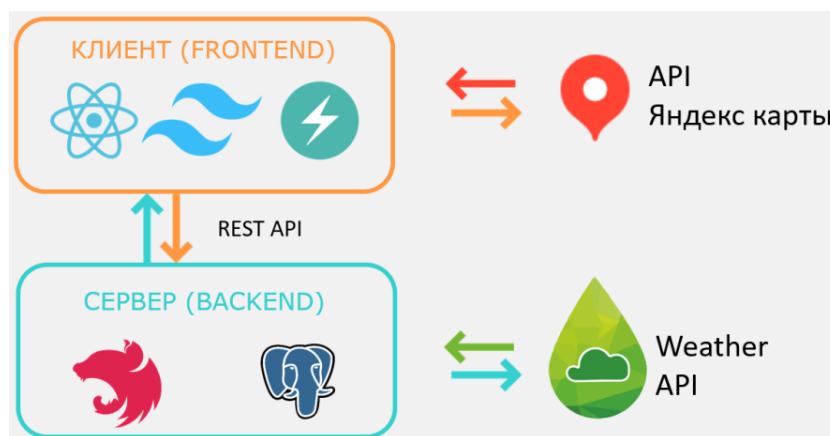


Рис. 3. Технологический стек

Использование данного технологического стека позволяет создать масштабируемое, функциональное и удобное для пользователей веб-приложение. Интеграция между компонентами системы обеспечивает надежность и производительность, что делает архитектуру подходящей для реализации сложных задач в рамках, визуализируя информацию.

На рисунке 4 представлена прогнозная карта риска снежных заносов на транспортной сети Норильск — Талнах за 04.12.2024 на 1 час ночи, полученная с использованием технологического стека.

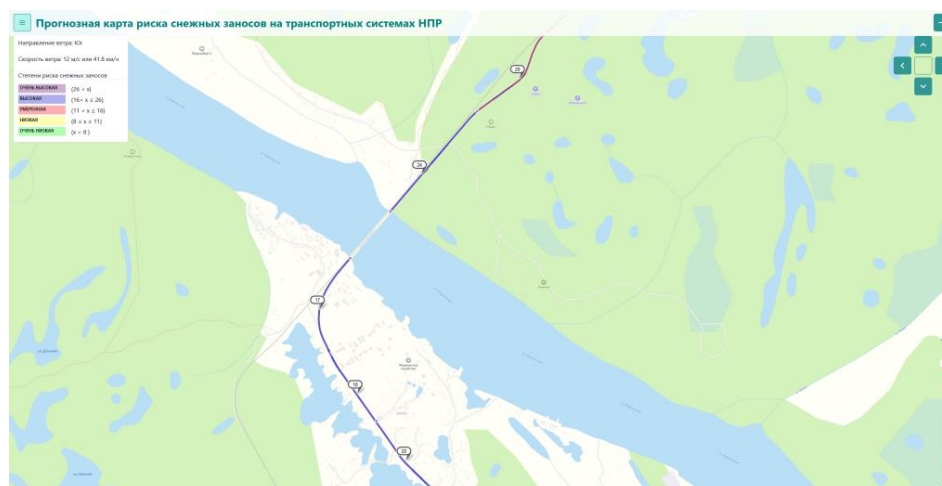


Рис. 4. Прогнозная карта риска снежных заносов на транспортной сети Норильск — Талнах за 04.12.2024 на 1 час ночи

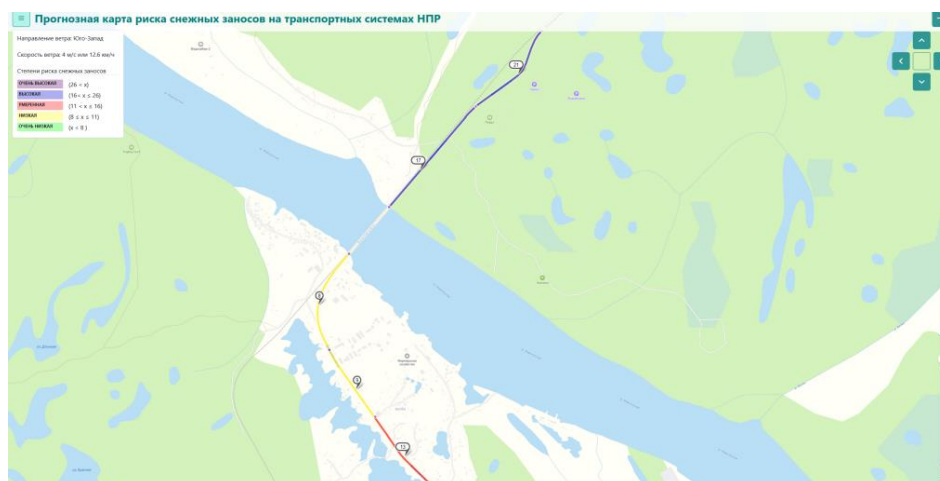


Рис. 5. Прогнозная карта риска снежных заносов на транспортной сети Норильск — Талнах за 04.12.2024 на 18 часов вечера

Разработанная цифровая прогнозная модель предназначена для поддержания работоспособного состояния гражданской и военной инфраструктуры, расположенной в районах РФ со сложными климатическими условиями, за счет достоверных прогнозов снегозаносимости, позволяющих определить количество снега на конкретных участках автомагистрали Норильск — Талнах за любой период времени.

Выводы

Представленный цифровой продукт является уникальным предложением на рынке услуг и в рамках пилотного проекта предназначен исключительно для использования в условиях Норильского района.

Создан инновационный бизнес-процесс, представляющий собой цифровую модель для непрерывной оценки и прогнозирования объемов снежных отложений на автомобильных дорогах. Этот инструмент позволяет оптимизировать затраты на снегоуборочные работы путем эффективного распределения снегоуборочной техники.

Разработанная модель выступает в качестве цифрового инструмента, направленного на обеспечение и повышение безопасности и непрерывности движения автотранспорта в городе, расположенном в субарктической зоне РФ.

Список источников

1. Афанасьев, В. А. Эксплуатация транспортных систем в Арктике / В. А. Афанасьев, В. В. Бутюгин, В. В. Климентьев. — Текст : непосредственный // Крайний Север—96. Механика. Строительство, технологии, методы, средства : сборник докладов региональной науч.-техн. конференции. — Норильск : Норильский индустриальный институт, 1996.

2. Афанасьев, Б. А. Снежные заносы на транспортных магистралях Норильского промышленного района, пути решения проблемы / Б. А. Афанасьев, В. В. Бутюгин. – Текст : непосредственный // Сб. трудов науч.-практ. семинара «Геоэкологические геоэкологические проблемы строительства в районах Крайнего Севера», 15–17 марта 2001 г. / Администрация г. Норильска, ОАО «НГК Норильский никель». Норильск, 2001.
3. Шкода, В. С. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог в районах Крайнего Севера (на примере Норильского промышленного района) / В. С. Шкода, В. В. Бутюгин. – Текст : непосредственный // Сб. трудов науч.-техн. конференции «Архитектура и строительство. Наука, образование, технологии, рынок». – Томск : Томский госуд. ун-т, 1999.
4. Дюнин, А. К. Структура метелевого снега и закономерности снегового потока / А. К. Дюнин. – Текст : непосредственный // Вопросы использования снега и борьба со снежными заносами и лавинами. – Москва : АН СССР. – С. 100–119.
5. Петров, А. М. Анализ существующих решений совершенствования измерительно-вычислительных комплексов сетей теплоснабжения / А. М. Петров, А. Н. Попов. – DOI 10.15593/2224-9826/2021.1.02. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 18–29.
6. Дюнин, А. К. Механика метелей / А. К. Дюнин. – Новосибирск : АН СССР, 1963. – 378 с. – Текст : непосредственный.
7. Бутюгин, В. В. К вопросу о формировании снежного покрова на территории Норильского района / В. В. Бутюгин, Л. И. Петухова. – Текст : непосредственный // Достижения науки и техники — развитию Норильского промышленного района : сборник докладов региональной научно-технической конференции. – Норильск: Норильский индустриальный институт, 2003.
8. Особенности эксплуатации зданий и сооружений на Таймыре: сборник науч. трудов / под редакцией В. Ю. Сеткова. – Норильск : Норильский индустриальный институт, 2005. – 302 с. – Текст : непосредственный.
9. Техническая эксплуатация зданий и сооружений на севере Красноярского края: монография / В. Ю. Сетков, Т. Р. Гамидов, Н. А. Губина [и др.]. – Норильск : Норильский индустриальный институт, 2005. – 229 с. – Текст : непосредственный.
10. Бутюгин, В. В. Инженерная геодинамика снега. Норильский регион: монография / В. В. Бутюгин. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2008. – 185 с. – Текст : непосредственный.
11. Petrov, A. Application of computer vision technology in the development of ultrasonic repeller / A. Petrov, A. Popov. – DOI 10.1051/e3sconf/202016406013. – Text : direct // E3S Web of Conferences: EDP Sciences, 2020. – Vol. 164. – P. 06013.
12. Petrov, A. Visualization of physical and mathematical models of thermodynamic processes of single-phase flows using MATLAB to diagnose the condition of external heat supply networks / A. Petrov, A. Popov. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052069. – Text : direct // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2131, Issue 5. – P. 052069.

13. Петров, А. М. Лабораторные испытания измерительно-вычислительного комплекса для диагностики термодинамических процессов однофазных потоков / А. М. Петров, А. Н. Попов. – Текст : непосредственный // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 7. – С. 81–85.
14. Ружьев, В. А. Моделирование управлением смешанными перевозками при оптимизации эффективности логистических систем / В. А. Ружьев, Р. Ю. Максименко. – Текст : непосредственный // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, Санкт-Петербург-Пушкин, 28-30 января 2016 г. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – 2016. – С. 435–437.
15. Mathematical model of crossing of discrete snow obstacles / V. Makarov, D. Belyaev, A. Papunin [et al.]. – DOI 10.1051/e3sconf/202338302016. – Text : direct // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Vol. 383. – P. 02016.

References

1. Afanas'ev, V. A. Butyugin, V. V. & Kliment'ev V. V. (1996). Ekspluatatsiya transportnykh sistem v Arktike. Krayniy Sever–96. Mekhanika, stroitel'stvo, tekhnologii, metody, sredstva : sbornik dokladov regional'noy nauch.-tekhn. konferentsii. Noril'sk : Noril'skiy industrial'nyy institute Publ.(In Russian).
2. Afanas'ev, B. A. & Butyugin V. V. (2001). Snezhnye zanosy na transportnykh magi-stralyakh Noril'skogo promyshlennogo rayona, puti resheniya problem. Sb. tr. nauch.-prakt. seminara «Geokriologicheskie geoeologicheskie problemy stroitel'stva v rayonakh Kraynego Severa», 15–17 marta 2001. Noril'sk. Administratsiya g. Noril'ska, OAO «NGK Noril'skiy nikel'». (In Russian).
3. Shkoda, V. S., & Butyugin, V. V. (1999). Problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatsii avtomobil'nyh dorog v rajonah Kraynego Severa (na primere Noril'skogo promyshlennogo rajona). Arhitektura i stroitel'stvo. Nauka, obrazovanie, tekhnologii, rynek: Sb. trudov nauch.- tekhn. konf. Tomsk. Tomskij gosud. un-t Publ. (In Russian).
4. Dyunin, A. K. (1956). Struktura metelevogo snega i zakonomernosti snegovogo potoka. Voprosy ispol'zovaniya snega i bor'ba so snezhnymi zanosami i lavinami. Moscow, AN SSSR Publ., pp. 100-119. (In Russian).
5. Petrov, A. M., & Popov, A. N. (2021). Analysis of existing solutions for improving the measuring and computing complexes of heat supply networks. Construction and Geotechnics, 12(1), pp. 18-29. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.02.
6. Dyunin, A. K. (1969). Mekhanika metelej. Novosibirsk. SO AN SSSR Publ., p. 378. (In Russian).
7. Butyugin, V. V., Petuhova, L. I. (2003). K voprosu o formirovanii snezhnogo pokrova na territorii Noril'skogo rajona. Dostizheniya nauki i tekhniki – razvitiyu Noril'skogo promyshlennogo rajona: Sb. dokl. region. nauch.- tekhn. konf. Noril'sk, Noril'skiy industr. in-t Publ. (In Russian).

8. Osobennosti ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy na Taymyre: sbornik nauch. trudov. (2005). Noril'sk, Noril'skiy industrial'nyy institute Publ., p. 302. (In Russian).
9. Setkov, V. Yu., Gamidov, T. R., Gubina, N. A., Prishchepova, N. A., Ryseva, O. P., & Kopylov, A. A. (2005). Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zdaniy i sooruzheniy na Severe Krasnoyarskogo kraya. Noril'sk, Noril'skiy industrial'nyy institut Publ., p. 229. (In Russian).
10. Butyugin, V. V. (2008). Inzhenernaya geodinamika snega. Noril'skiy region: monografiya. Sankt-Peterburg, GUAP Publ., 185 p. (In Russian).
11. Petrov, A., & Popov, A. (2020). Application of computer vision technology in the development of ultrasonic repeller. In E3S Web of Conferences, (164), p. 06013. EDP Sciences. (In English). DOI 10.1051/e3sconf/202016406013.
12. Petrov, A., & Popov, A. (2021). Visualization of physical and mathematical models of thermodynamic processes of single-phase flows using MATLAB to diagnose the condition of external heat supply networks. In Journal of Physics: Conference Series, 2131(5), p. 052069. IOP Publishing. (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052069
13. Petrov, A. M. & Popov, A. N. (2022). Laboratory tests of the measuring and computing complex for diagnostics of thermodynamic processes of single-phase flows. Innovation & Investment, (7), pp. 81-85. (In Russian).
14. Ruzh'ev, V. A. & Maksimenko, R. Yu. (2016). Modelirovanie upravleniem smeshannymi perevozkami pri optimizatsii effektivnosti logisticheskikh system. Nauchnoe obespechenie razvitiya APK v usloviyah importozameshcheniya: sb. nauch. tr. mezhd. nauch.-prakt. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava, Sankt-Peterburg-Pushkin, 28-30 yanvarya 2016 g. / Sankt-Peterburg Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyy agrarnyy universitet Publ., pp. 435-437. (In Russian).
15. Makarov, V., Belyaev, D., Papunin, A., Klyushkin, A., Ruzhev, V., & Gubarev, V. (2023). Mathematical model of crossing of discrete snow obstacles. In E3S Web of Conferences, (383), p. 02016. EDP Sciences. (In English). DOI 10.1051/e3sconf/202338302016

Информация об авторах / Information about the authors

Беляев Игорь Сергеевич, кандидат экономических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой информационных систем и технологий, Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского, г. Норильск,

Рысева Ольга Павловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и теплогазоснабжения, Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского, г. Норильск

Igor S. Belyaev, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Information Systems and Technologies, Fedorovsky Polar State University, Norilsk

Olga P. Rysyeva, Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Construction and Heat and Gas Supply, Fedorovsky Polar State University, Norilsk

Громов Владимир Алексеевич, ассистент кафедры информационных систем и технологий, Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского, г. Норильск

Ружьев Вячеслав Анатольевич, кандидат технических наук, директор Инженерно-технологического института, заведующий кафедрой технических систем в агробизнесе, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин

Пирогов Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, pirogovsp@tyuiu.ru

Vladimir A. Gromov, Assistant of the Department of Information Systems and Technologies, Fedorovsky Polar State University, Norilsk

Ruzhev A. Vyacheslav, Candidate of Engineering, Director of the Engineering and Technology Institute, Head of the Department of Technical Systems in Agribusiness, St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin

Sergey P. Pirogov, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, pirogovsp@tyuiu.ru

Статья поступила в редакцию 27.02.2025; одобрена после рецензирования 03.03.2025; принята к публикации 17.03.2025.

The article was submitted 27.02.2025; approved after reviewing 03.03.2025; accepted for publication 17.03.2025.