

Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области

В.П. Горбатенко, М.А. Волкова, О.В. Носырева, И.В. Кужевская*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 36

*адрес для переписки: vpgor@ggf.tsu.ru

Реферат. Целью работы является анализ изменений климатических параметров, которые оказывают большое влияние на безопасное функционирование транспорта и сохранность дорог. Исследованы временная и пространственная изменчивости следующих климатических характеристик: средние и экстремальные значения температуры воздуха и атмосферных осадков, частота переходов средней суточной температуры воздуха через 0°C, характеристики снежного покрова, направление и скорость ветра, повторяемость метелей и гололедно-изморозевых явлений. Установлено, что на развитие транспортной системы оказывают негативное воздействие:

- Выросшая экстремальность климата.
- Смещение дат устойчивого перехода средних суточных температур воздуха через 0 и 5°C. Весной они смещаются на более ранние, а осенью – на более поздние сроки. Поэтому сокращается период использования «зимников», увеличивается и число переходов температуры воздуха через 0°C.
- Повсеместный рост сумм годовых осадков от 5 мм/10 лет до 20 мм/10 лет. Уменьшение периодов с кратковременными осадками (1-5 дней) и увеличение более продолжительных (6-10 дней), с преобладанием ливневых.
- Увеличение числа и средней продолжительности периодов зимней скользкости (с вероятностью 95%), особенно заметное в северных районах области, где актуально строительство новых дорог.

К благоприятным для развития транспортной инфраструктуры факторам относятся:

- Уменьшение ветровых нагрузок. Число дней с ветром 15 м/с и более сократилось на 70-80 %, варьируя в диапазоне 5-15 дней.
- Сокращение числа и продолжительности метелей в 1.5-2 раза.
- Уменьшение продолжительности залегания снежного покрова, обусловленное изменением сроков его залегания и разрушения, которые способствуют уменьшению снегопереноса.

Из анализа совокупности факторов можно утверждать, что изменения климата не становятся более благоприятными для развития транспортной системы Томской области. Вероятно, более быстрое разрушение дорожных покрытий, чем было предусмотрено в предыдущий климатический период. Соответственно необходимо усиливать меры по увеличению стойкости дорож-

ных покрытий по всей территории области.

Ключевые слова. Развитие транспортной системы, изменение климата, Томская область.

Modern trends in climatic characteristics affecting the development of the transport system of the Tomsk region

V.P. Gorbatenko, M.A. Volkova, O.V. Nosyreva, I.V. Kuzhevskaya*

National Research Tomsk State University
36 Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russian Federation

Correspondence address: vpgor@ggf.tsu.ru

Abstract. The aim of the work is to analyze changes in climatic parameters that have a great impact on the safe operation of transport and the safety of roads. The temporal and spatial variability of the following climatic characteristics was investigated: average and extreme values of air temperature and atmospheric precipitation, the frequency of transitions of the average daily air temperature through 0°C and 5°C, characteristics of snow cover, direction and speed of wind, frequency of snowstorms and ice-rime phenomena. It was found that the development of the transport system is negatively impacted by:

- Increased climate extremity.
 - Shift of dates of stable transition of average daily air temperatures through 0 and 5°C. In spring they shift to earlier dates, and in autumn to later dates. Therefore, reducing the period of use of "winter roads". The number of transitions of air temperature through 0°C also increases.
 - A widespread increase in the amount of annual precipitation from 5 mm / 10 years to 20 mm / 10 years. A decrease in periods with short-term precipitation (1-5 days) and an increase in longer periods (6-10 days), with a predominance of heavy rainfall.
 - The increase in the number and average duration of slippery winter periods (with a probability of 95%) is especially noticeable in the northern regions of the region, where the construction of new roads is important.
- Factors favorable for the development of transport infrastructure include:
- Reduction of wind loads. The number of days with a wind of 15 m/s and more decreased by 70-80%, varying in the range of 5-15 days.
 - Reducing the number and duration of snowstorms by 1.5-2 times.
 - Decrease in the duration of snow cover, due to a change in the timing of its formation and destruction, which contribute to a decrease in snow supply.

Analysis of the combination of factors allows us to assert that climate change is not becoming more favorable for the development of the transport system of the Tomsk region.

There is a high likelihood of a more rapid destruction of road surfaces than in the previous climatic period. It is necessary to strengthen measures to increase the durability of road surfaces throughout the region.

Keywords. Development of the transport system, climate change, Tomsk region.

Введение

Изменение климата широко признано серьезнейшей проблемой, затрагивающей не только окружающую среду, но также общество и экономику мира. Опубликовано достаточно много научных статей и отчетов, посвященных как анализу прошлых и прогнозу будущих тенденций изменения климата, так и оценке воздействия изменения климата на здоровье человека, производство продуктов питания и многие другие, социальные и экономические аспекты жизнедеятельности (Kostianaia et al., 2021).

Поскольку разные регионы различаются по скорости изменения климата и по экономическим возможностям принятия мер по адаптации к его изменениям, региональный анализ тенденций прикладных климатических характеристик необходим для адекватной подготовки к таким изменениям. Такие исследования актуальны, чтобы снизить потенциальные финансовые потери на фоне изменившегося климата или свести к минимуму любую возможность их возникновения. Ряд таких исследований, проведенных в регионах, испытавших экономические потери, сосредоточен на оценке влияния изменения климата на транспортные системы Европы (Dobney et al., 2009; Nemr, Demirel, 2012), Канады (Palco, Lemmen, 2017), территории России (Kostianaia et al., 2021). В них большей частью обсуждается влияние климата на функционирование железнодорожной сети. Аналогичные исследования актуальны и для успешного функционирования других транспортных систем: автомобильной, судоходства, малой авиации. Результаты таких исследований будут востребованы при выборе инженерных решений, обеспечивающих устойчивость дорожных покрытий, объектов инфраструктуры, в первую очередь в районах, где тает вечная мерзлота, меняется экстремальность климата.

Территория юго-востока Западной Сибири отличается сравнительно низкой транспортной освоенностью. В особенности это касается Томской области, которая занимает 70 и 72 места соответственно по густоте автомобильных и железных дорог среди регионов России, а по объему перевозимых грузов находится на 32 месте (Транспортная стратегия..., 2008), но имеет высокую хозяйственно-экономическую значимость благодаря концентрации природных ресурсов. Согласно долгосрочной стратегии социально-экономического развития Российской Федерации, приоритетными в новом тысячелетии являются задачи развития грузоперевозок в международных транспортных коридорах, а для отдельных субъектов Российской Федерации актуальным остается модернизация и совершенствование транспортной инфраструктуры для обеспечения надежного регионального и межмуниципального сообщения (Транспортная стратегия..., 2008). Это особенно важно для территории Томской области. На сегодняшний день общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием на территории области – 7156 км (рис. 1). Функционируют автомобильные дороги, обеспечивающие межрегио-

нальные связи по ряду направлений. Протяженность водных путей – 5195 км. Эксплуатационная длина железных дорог составляет 346 км. В Томской области действуют аэропорт Богашево (Томск), внутри региональные аэропорты и площадки областного значения, в том числе вертолетные. Освоение газо- и нефтедобывающих территорий правобережья р. Обь требует открытия новых объектов для осуществления авиаперевозок. В условиях удаленности от главной железной дороги РФ – Транссиба – основную нагрузку в транспортном обеспечении выполняет автомобильный транспорт (85%). В течение всего срока службы дороги подвержены активному воздействию неблагоприятных погодных условий: замерзание и оттаивание грунтов, разрушения, обусловленные интенсивными осадками, снежные заносы, обледенение и пр.

Важной составляющей обеспечения эффективности и безопасности работы транспорта является климатологическое обслуживание, направленное как на снижение последствий от опасных и неблагоприятных влияний погоды, наносящих материальный и социальный ущерб, так и на оптимизацию затрат на содержание дорог и проведение ремонтно-восстановительных работ. Для реализации планов по строительству новых дорог в Западной Сибири, в том числе в рамках Стратегии развития транспортной системы Томской области в 2008-2025 гг. (Стратегия развития..., 2008), необходимо обеспечение организаций, участвующих в решении поставленных задач, информационными ресурсами о текущем и будущем климате региона. Знание тенденций изменчивости основных климатических характеристик необходимо для решения задач проектирования, строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог, а также обеспечения безопасности дорожного движения. Кроме автомобильных дорог с асфальтовым покрытием в холодный период года в Томской области широко распространены зимние дороги – так называемые «зимники» (рис. 1). Зимники – основные транспортные артерии для газонефтяных промыслов. В пик функционирования, который обычно приходится на февраль, на прямых открытых участках зимник по своим свойствам практически ничем не отличается от дорог с твердым покрытием. В среднем по Томской области, он служит три зимних месяца. Поскольку наблюдавшееся в последние десятилетия глобальное потепление, в большей степени изменяло уровень средних значений температуры воздуха зимних месяцев, особенно актуальным становится анализ показателей прикладной климатологии, используемых при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

Целью настоящей работы является анализ изменений основных климатических характеристик Томской области, которые имеют большое значение при планировании развития транспортной инфраструктуры, включая автомобильные дороги как регионального, так и федерального значения.

Материалы и методы

Поскольку протяжённость Томской области с севера на юг около 600 км, с запада на восток – 780 км, а площадь составляет 314 391 км², то погода и кли-

матические характеристики на ее территории неодинаковы (Евсеева, 2001). Область расположена в пределах 55.6-61° с.ш., потому тенденции изменчивости ее климатических ресурсов целесообразно рассматривать не для всей территории, а в пределах разных географических широт. Вся территория области была поделена на 3 зоны в соответствии с протяженностью с севера на юг. Каждая из зон (северная, центральная и южная) получилась протяженностью примерно 200 км. Такое деление также обусловлено тем, что дороги с асфальтовым покрытием сконцентрированы в южной части области, зимники – в ее северной части, а в центральной части присутствуют дороги с разными типами покрытий (рис. 1).

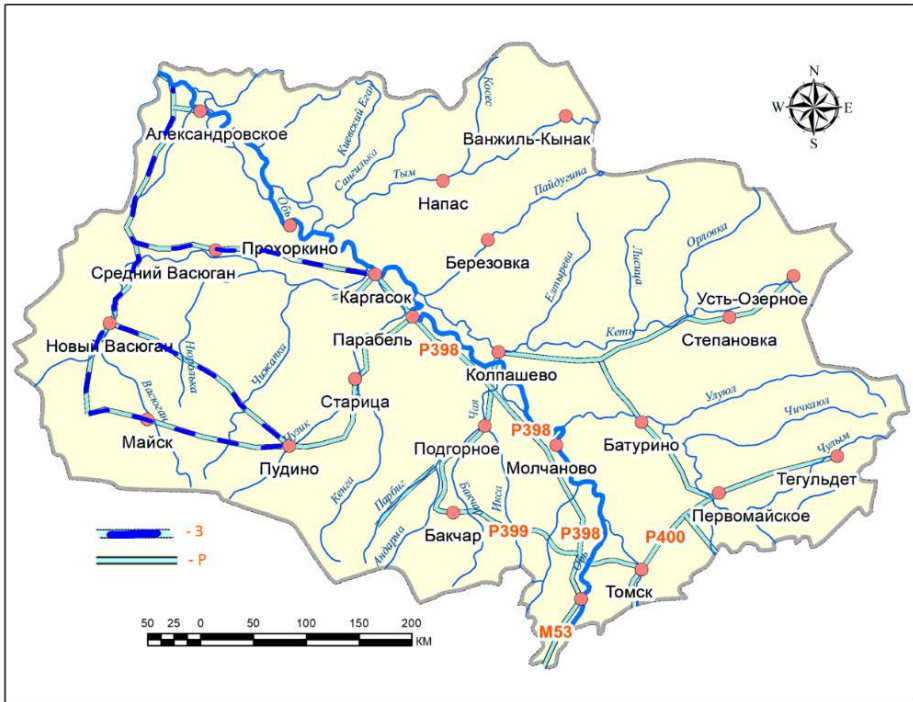


Рисунок 1. Карта-схема расположения автомобильных дорог Томской области различного покрытия

Сплошная линия – региональные магистрали, пунктирная – зимники

Figure 1. Schematic map of the location of highways in the Tomsk region of various surfaces

Solid line - regional highways, dotted line – winter roads

Для исследования пространственно-временных изменений метеорологических и расчетных параметров, характеризующих современные климатические условия на территории Томской области, были привлечены следующие многолетние данные:

- температура воздуха (минимальная, средняя и максимальная) суточного и годового разрешения за период 1960-2019 и 1935-2019 гг. соответственно из архива ВНИИГМИ-МЦД (meteo.ru);

- суммы атмосферных осадков суточного и срочного разрешения за период 1960-2019 гг. (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru);

– высота снежного покрова суточного разрешения за период 1960-2019 гг. (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru);

– скорость ветра и атмосферные явления (метель) срочного разрешения за период 1960-2019 гг. (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru);

– информация о гололедно-изморозевых явлениях срочного разрешения 2000-2019 гг. (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru) и штормовых оповещениях за 2007-2019 гг., предоставленные Томским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета (<http://www.meteo-tomsk.ru>).

Методы исследования: статистический анализ метеорологических рядов и географический анализ пространственной локализации анализируемых тенденций. Обработка данных осуществлялась стандартными методами математической статистики с помощью пакетов прикладных программ (Statistica и MS Excel). Статистическая значимость выявленных тенденций оценивалась с помощью критерия Стьюдента (при 5%-ном уровне значимости).

Результаты и дискуссия

Температура воздуха и ее экстремумы

Наряду с транспортными нагрузками, на прочность эксплуатируемых дорожных покрытий огромное влияние оказывают температура окружающего воздуха, влажность, атмосферные осадки и их интенсивность в разные сезоны года, высота снежного покрова, глубина промерзания почвы, направление и скорость ветра. Количество и распределение атмосферных осадков по сезонам года тоже имеет большое значение, поскольку от них зависит водно-тепловой режим земляного полотна и дорожного покрытия.

Многолетняя изменчивость средних значений температуры воздуха территории Томской области изучена на примере рядов наблюдений 40 метеорологических станций, расположенных как внутри территории, так и за ее границами (Барашкова и др., 2014). Установлено, что на всей территории области на фоне значительной межгодовой изменчивости средней годовой температуры воздуха, наблюдается ярко выраженная и статистически значимая тенденция потепления (рис. 2), усилившаяся с 70-х г. XX века (скорость изменения температуры воздуха составила $0.4-0.6^{\circ}\text{C}/10$ лет). Средняя годовая температура даже самых северных станций в последнее десятилетие рассматриваемого периода все чаще случается положительной.

Пространственные распределения средней годовой температуры воздуха характеризуются постепенным увеличением с севера на юг, что обусловлено широтными изменениями радиационного и теплового баланса. Самыми холодными являются северные и северо-восточные районы области, где среднегодовая температура составляет $-1.5 \div -2.5^{\circ}\text{C}$. В юго-восточном направлении среднегодовые температуры повышаются, становятся положительными и в отдельные годы достигают 2.9°C .

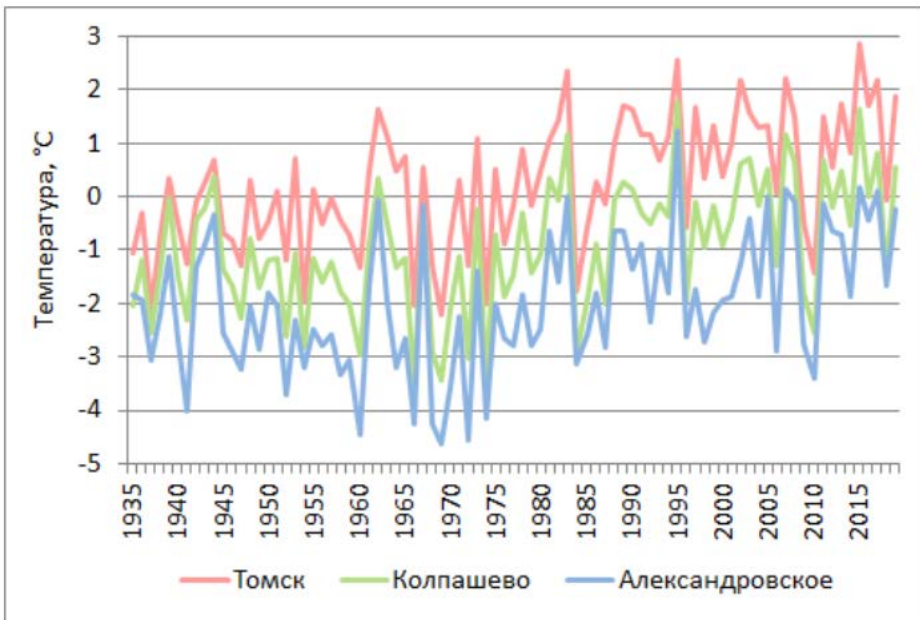


Рисунок 2. Межгодовая изменчивость средней годовой температуры воздуха на станциях Томск (южная часть Томской области), Колпашево (центральная часть) и Александровское (северная)

Figure 2. Interannual variability of the average annual air temperature at the stations Tomsk (southern part of the Tomsk region), Kolpashevo (central part) and Aleksandrovskoe (northern)

Тенденции увеличения средних значений температуры воздуха в зимние месяцы наблюдались на протяжении всего периода потепления, а в летние месяцы – в основном в последнее десятилетие (Кужевская и др., 2015). Скорость потепления примерно одинакова по всей территории области. Следовательно, изменения климатических характеристик, влияющих на сохранность автомобильных дорог и безопасность дорожного движения можно ожидать в течение всего календарного года и по всей территории. Тем не менее, комплексные характеристики, производные от значений температуры воздуха, могут отличаться ввиду большой протяженности и разнообразия подстилающей поверхности исследуемой территории. На анализе таких характеристик и сделан акцент в настоящей работе.

Низкие отрицательные температуры

Наибольшее влияние на работу транспортной системы Западной Сибири, особенно на сохранность и качество зимников, оказывает температура воздуха зимних месяцев. При низких отрицательных температурах (-30 , -40°C) аварии могут возникнуть из-за поломки автомобилей, а также увеличивается время на запуск двигателя машины. Необходимы дополнительные меры по обеспечению незамерзания воды и масла в системах автомобилей. Кроме того, в условиях слишком высоких и слишком низких температур наблюдается рост аварийности из-за ухудшения психофизического состояния водителей. Комфортные условия в кабине водителя и салонах грузопассажирских

транспортных средств должны составлять около 20°C. Низкие температуры сказываются также на качестве дорожного полотна, вызывают пучения и размывы дорожных одежд. В зависимости от средней температуры самого холодного месяца используются разные строительные материалы.

Для железнодорожного транспорта, развитие которого для Томской области не менее актуально, опасными факторами являются экстремальные температура воздуха – более 25°C и менее -25°C. Под влиянием высокой температуры рельсы удлиняются и могут произойти сгон стыков, образование так называемых «слепых зазоров», что приводит к «выбросу» пути. Низкие температуры воздуха вызывают укорачивание рельса и нарушение изоляции стыков, вследствие чего происходят их разрыв и излом. Кроме этого, при температуре воздуха $\leq -25^\circ\text{C}$, особенно если такая температура сохраняется длительное время, происходит замораживание пассажирских вагонов, то есть выход из строя водяной отопительной системы: разрыв котла и труб, появление ледяных пробок в магистрали.

Среднесуточные температуры воздуха ниже или равные -25°C относятся к опасным метеорологическим условиям для зимней эксплуатации автомобильных дорог. Это обусловлено тем, что при таких значениях температуры свойства поверхности покрытых льдом дорог меняются. В морозный, но ясный день лед может подтаивать, становиться гладким, что приводит к уменьшению коэффициента сцепления шин с дорожным полотном. С повышением же температуры выше -15°C лед размягчается, на нем образуется водяная пленка, также резко снижающая сцепные свойства. Распределение на территории Томской области повторяемости температуры воздуха (число дней), равной и ниже -25°C представлено на рис. 3.

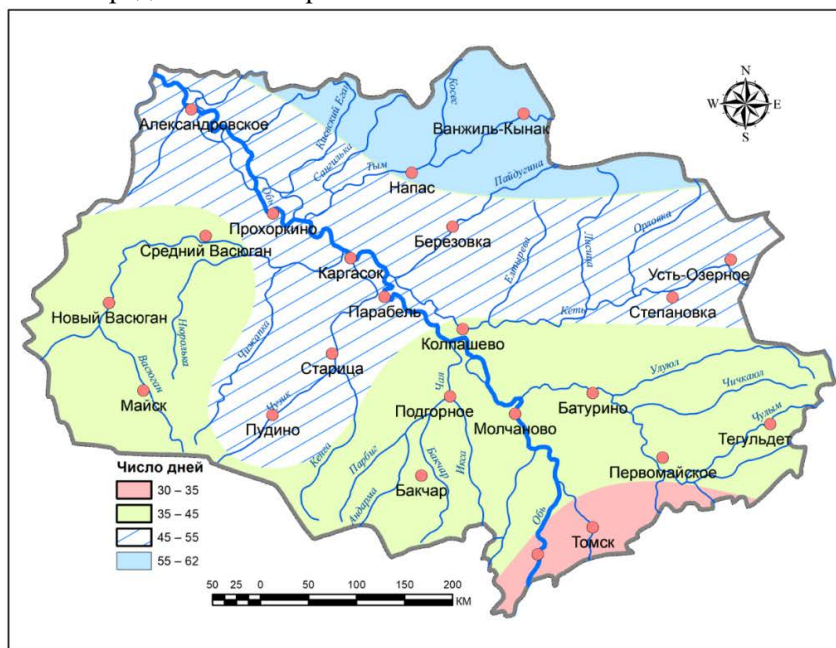


Рисунок 3. Число дней с минимальной температурой воздуха $\leq -25^\circ\text{C}$

Figure 3. Number of days with minimum air temperature $\leq -25^\circ\text{C}$

Как видно из рисунка, среднее число дней со среднесуточной температурой воздуха ниже -25°C в северных районах области почти вдвое больше, чем в южных. Среднее многолетнее число периодов с температурой $\leq -25^{\circ}\text{C}$ за год варьирует от 11 в южной части области до 17 на северо-востоке. Средняя продолжительность непрерывных периодов низких температур по всей территории области составила 3-4 дня, максимальная в северной части области может достигать 28-35 дней (например, с 16 декабря 2009 по 19 января 2010 г.). В 80% случаев продолжительность периодов с такими температурами составляет от одного до пяти дней. Но, несмотря на наличие периодических составляющих в рядах многолетней изменчивости анализируемой характеристики, прослеживается устойчивая тенденция к уменьшению числа дней с температурой воздуха $\leq -25^{\circ}\text{C}$ на всей территории области, что несомненно является благоприятным фактором для развития транспортной системы.

Пространственно-временное распределение значений температур $\leq -30^{\circ}\text{C}$ аналогично распределению температур $\leq -25^{\circ}\text{C}$. В южной части области таких дней в году с средним около 20, в северной 30-35. Средняя продолжительность периодов с температурами $\leq -30^{\circ}\text{C}$ составляет 3-4 дня. Оценка динамики числа дней с температурой воздуха $\leq -30^{\circ}\text{C}$ показала тенденцию к снижению, со скоростью около 2 дней/10 лет.

Высокие положительные температуры

Высокие положительные температуры встречаются в Томской области не так часто, как низкие, но в последнее десятилетие и их продолжительность увеличивается. Высокая температура покрытия приводит к образованию наплывов на асфальтовом покрытии дорог, их размягчению и повреждению колесами автотранспорта. При этом воздействию высоких температур подвергаются не только объекты транспортной инфраструктуры, но и человек. В сфере железнодорожного транспорта в сильную жару создается риск деформации рельсов, чреватый аварией. В этой ситуации принято осуществлять контроль состояния как автомобильных дорог, так и железнодорожных путей.

В рамках настоящих исследований анализировалась повторяемость средних многолетних значений числа дней с максимальной температурой воздуха $\geq 25^{\circ}\text{C}$ и $\geq 30^{\circ}\text{C}$. Число дней с максимальной температурой воздуха $\geq 25^{\circ}\text{C}$ меняется по территории области от 30 в северной части до 40 в южной. Максимальное число дней с высокими температурами составляет 60-70 дней в году и наблюдалось в XXI веке (2012 и 2016 годы). Среднее число дней с максимальной температурой воздуха $\geq 30^{\circ}\text{C}$ составляет 4-6 дней, а наибольшее – 22 дня наблюдалось в 2020 г. Статистически значимых тенденций в повторяемости таких температур не обнаружено.

Тенденции экстремумов температуры воздуха

Ведущую роль в формировании социально-экономических рисков играет повторяемость положительных и отрицательных экстремальных значений температуры воздуха. Результаты исследования повторяемости периодов с высокими температурами воздуха (волн жары) в теплый период года, свиде-

тельствуют о наличии тенденции повторяемости погоды, приводящей к ухудшению самочувствия людей (Кузевская и др., 2015; Огурцов и др., 2016), роста потребления электроэнергии, увеличения числа лесных пожаров (Горбатенко и др., 2015; Gorbatenko et al., 2020; Кижнер и др., 2021) и к ухудшению экологической обстановки в целом (Волкова и др., 2013). В нескольких регионах Западной Сибири, в ближайшем будущем в летний период следует ожидать высокую повторяемость волн жары. Следовательно, актуально проведение и соответствующих мероприятий, которые будут способствовать минимизации экономического и социального ущербов в разных отраслях экономики (Горбатенко, Кижнер, 2014). Продолжительные волны холода для зимних периодов в эпоху до глобального потепления были для исследуемой территории нормой, и к ним система хозяйственного комплекса была адаптирована. Поэтому анализ частоты формирования таких волн, охватывающих разные части территории области, имеет высокую практическую ценность.

В настоящем исследовании в качестве критерия для выделения волн тепла или холода использовался 95- и 5-процентный процентиля среднесуточной температуры воздуха, при этом установлено, что пороговое значение превышает непрерывно на протяжении 5 суток и более. Выявление наличия температурных волн и их продолжительности для каждого года анализируемого периода приведено в табл. 1.

В годовом ходе волны тепла, выделенные по таким критериям, фиксируются с мая по сентябрь, при этом чаще всего отмечаются в июне и августе. Волны холода выявляются в любом месяце, в холодный период настолько сильные аномалии холодной погоды отмечаются 1 раз в 5 лет, в теплый 1 раз в 10 лет. Получено, что от 30 до 60% всех волн тепла на территории Томской области зафиксировано после 2000 года, волн холода в этот период – 10-30%. Что касается волн холода, то их повторяемость в XXI веке практически не изменилась в центральной части области, в северной и южной частях области их число несколько уменьшилось. Заметим, что резкие изменения температуры воздуха фиксируются как минимум на 70-80% площади области.

Таблица 1. Повторяемость волн тепла и холода

Table 1. Heat and cold wave repeatability

Части территории Томской области	Волны тепла		Волны холода	
	Количество	После 2000г, %	Количество	После 2000г, %
Северная	12-15	30-35	14-16	10-25
Центральная	14-18	20-25	10-16	20-30
Южная	8-15	50-60	12-20	15-20

Таким образом, можно заключить, что экстремальность климата северной и южной частей территории Томской области увеличивается. Соответственно следует ожидать более быстрого разрушения дорожных покрытий, чем было предусмотрено в предыдущий климатический период. Следовательно, необходимо усиливать меры по повышению стойкости дорожных покрытий на севере, юге и, по-видимому, в центральной части области.

Переходы температуры воздуха через 0 и 5°C

Наибольшее влияние на состояние и качество любого дорожного покрытия оказывают погодные условия, при которых происходит переход (единожды за сутки или многократно) температуры воздуха через 0°C. С увеличением таких переходов ухудшаются условия эксплуатации зданий и сооружений, в частности, сокращается период их доремонтной эксплуатации, уменьшается долговечность. Такие погодные условия характерны для длительных периодов холодного сезона. Для определения периода производства основных дорожных работ (укладка железобетонных, асфальтовых покрытий) весной и осенью принят устойчивый переход средней суточной температуры через 5°C, поэтому изучение тенденции этой характеристики не менее актуально. За случай перехода температуры через 0°C бралось каждое наблюдение, когда максимальная температура в конкретные сутки была положительной, а минимальная – отрицательной.

На территории Западной Сибири наблюдается смещение климатических сроков устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0 и 5°C, особенно заметное весной и осенью (Барашкова и др., 2015b). В Томской области весенние даты смещаются на более ранние сроки в среднем за 60-летний период 1960-2019 гг. на 2 дня за 10 лет, а осенние даты – на более поздние сроки в среднем на 1 день за 10 лет. Это приводит к увеличению продолжительности периодов с температурой выше 0°C и 5°C, которое происходит со скоростью 2-4 дня за 10 лет. Наиболее выраженные изменения значений характеристик наблюдаются на севере и юге области (табл. 2). При сравнении характеристик, полученных за период 1960-2019 гг. с аналогичными, рассчитанными за период 1990-2019 гг., видно, что выявленные тенденции не только сохраняются, но и усиливаются. Например, тенденции дат перехода температуры через 0°C весной и продолжительности периода с температурой выше 0°C возрастают до 3-4 дней за 10 лет. Общая продолжительность периода с температурой выше 5°C также растет, но в центральной части территории чуть больше, чем на севере и в центре области. Средние значения всех анализируемых параметров за последнее 30-летие имеют единый характер изменения по сравнению с 60-летним периодом: весенние даты становятся более ранними, осенние даты – более поздними, продолжительности периодов – более длительными. Наибольшие изменения выявлены для весенних дат перехода через 0°C и продолжительности периода 5°C на севере (4-5 дней) и на юге (4-7 дней) области.

Следовательно, на севере области планирование противогололедных мероприятий в весенний период рекомендуется сдвинуть раньше на две недели, в южной части на неделю, причем продолжительность выполнения таких мероприятий должна быть увеличена практически на месяц. В осенний период такие мероприятия следует планировать позднее и также с большей продолжительностью.

Продолжительность периода благоприятного для производства основных дорожных работ на севере области увеличилась на неделю, в южной части –

на 4 дня, тенденции увеличения этого периода по всей территории области положительные.

Таблица 2. Характеристики устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0°С и 5°С в разные периоды и их многолетние тенденции

Table 2. Characteristics of a stable transition of the average daily air temperature through 0°С and 5°С in different periods and their long-term tendencie

Показатели		Части территории Томской области					
		северная		центральная		южная	
		1960-2019 гг.	1990-2019 гг.	1960-2019 гг.	1990-2019 гг.	1960-2019 гг.	1990-2019 гг.
Устойчивый переход температуры через 0°С весной	среднее, дата	17.04	13.04	11.04	10.04	08.04	05.04
	тенденция, дней/10 лет	-2	-4	-1	-4	-2	-3
Устойчивый переход температуры через 0°С осенью	среднее, дата	16.10	17.10	19.10	21.10	21.10	24.10
	тенденция, дней/10 лет	1	-1	1	-2	2	-1
Продолжительность периода с температурой выше 0°С	среднее, дни	182	187	191	194	195	202
	тенденция, дней/10 лет	3	4	2	3	4	3
Устойчивый переход температуры через 5°С весной	среднее, дата	08.05	05.05	30.04	27.04	29.04	26.04
	тенденция, дней/10 лет	-2	0	-2	-2	-3	-3
Устойчивый переход температуры через 5°С осенью	среднее	26.09	28.09	30.09	01.10	02 .10	03.10
	тенденция, дней/10 лет	1	1	0	-2	1	-1
Продолжительность периода с температурой выше 5°С	среднее, дни	141	147	153	158	156	160
	тенденция, дней/10 лет	4	1	3	1	2	4

Атмосферные осадки

В транспортной отрасли показатели атмосферных осадков используются для проектирования автомобильных дорог. Учитывается повторяемость осадков 5 мм и более, выпадающих за сутки; для обеспечения сохранности дорог – информация о суточном максимуме осадков; для дорожного строительства и производства дорожных работ – повторяемость числа дней с осадками более 5 мм в сутки (Руководство по специализированному..., 2008). Осадки, особенно переохлажденные, приводят к формированию гололеда и других видов скользкости, представляющих угрозу для автомобильного транспорта. В связи с этим актуальным является уточнение тенденций количественных показателей режима атмосферных осадков на фоне меняющегося климата.

Диапазон пространственного изменения годовых сумм осадков на территории Томской области, составляет 450 мм (южная часть) – 590 мм (северо-восток). Во внутригодовом ходе максимальные суммы наблюдаются в теплый период года (апрель-октябрь), и их количество в 2-3 раза больше, по сравне-

нию с холодным периодом (ноябрь-март). Наибольшее количество осадков выпадает в июле-августе, что обусловлено влиянием активной циклонической деятельности и летних конвективных процессов. Наименьшие суммы осадков регистрируются в феврале-марте, что определяется влиянием Сибирского антициклона. Пространственное распределение сумм осадков за холодный и теплый периоды года несколько различаются. В теплый период в северной части территории осадков выпадает больше, чем в южной, а в холодный максимум осадков выпадает на северо-востоке и в южной части области. Однако годовое количество атмосферных осадков в течение последних десятилетий имеет тенденцию повсеместного роста на величину от 5 мм/10 лет до 20 мм/10 лет в разных районах области. По сравнению с периодом климатической нормы (1961-1990 гг.), суммы осадков на севере Томской области увеличились на 15% (особенно после 1997 года) (Титовская, Волкова, 2019). Полученные результаты согласуются с общими тенденциями на территории РФ, а также с ранее полученными выводами по Томской области (Барашкова и др. 2015а). Учитывая, что увеличилась, в основном, доля ливневых осадков, возможно, ожидать увеличения частоты затопления территорий, образования новых оврагов, оползней, провалов грунта. Если тенденция сохранится, то возможно и размывание фундаментов зданий и берегов рек. В городах это повлечет за собой затруднение работы транспорта.

Абсолютный суточный максимум осадков находится в диапазоне от 56 мм до 93.3 мм и приходится на центральную часть территории. На большинстве станций (70%) абсолютный суточный максимум осадков зарегистрирован в период после 1990-х гг., т.е. в период наиболее выраженного глобального потепления.

Средние многолетние суточные максимумы осадков (среднее арифметическое из суточных максимумов за каждый год) составляют 30-36 мм, при этом тенденции отражают разнонаправленную динамику, на большей части станций скорости изменения статистически незначимы. Однако, в северной части территории есть станции, где после 1991 года зафиксирован рост суточного максимума осадков на 9 мм, по сравнению с периодом нормы (1961-1990 гг.) (Огурцов и др., 2016).

При выборе дорожного покрытия, определении периода производства основных дорожных работ, проектировании снеготранспортирующей насыпи используются данные о числе дней с осадками различной величины (≥ 5 мм, ≥ 10 мм и др.). Число дней с осадками ≥ 5 мм составляет от 25 до 34 дней, при этом наблюдается уменьшение в направлении с севера на юг. Оценка временной динамики числа дней с осадками ≥ 5 мм показала незначительный рост: 1-1.5 дня/10 лет. Статистически значимые (с вероятностью 95%) тенденции фиксируются в центральной и южной частях области (табл. 3).

Число дней с суточным количеством осадков ≥ 10 мм составляет 8-11, при этом в межгодовой динамике их изменчивость существенно выше по сравнению с осадками ≥ 5 мм. За рассмотренный период можно отметить незначительный рост (до 1 дня/10 лет), статистически значимый на юге области. Число дней с суточным количеством ≥ 20 мм составляет около 2 дней, с

суточным количеством ≥ 30 мм – менее одного дня, при этом повышенное число дней характерно для северной части Томской области. Осадки указанных градаций наблюдаются не каждый год, тенденции изменения их статистически незначимы.

Таблица 3. Средние многолетние характеристики атмосферных осадков и тенденции изменения на территории Томской области

Table 3. Average long-term characteristics of atmospheric precipitation and tendencies of change in the territory of the Tomsk region

Показатель, ед. изм.	Среднее / Скорость изменения за 10 лет		
	Северная часть	Центральная часть	Южная часть
Годовая сумма осадков, мм	560/10	520/19	600/17
Сумма осадков за теплый период, мм	400/8	380/8	360/10
Сумма осадков за холодный период, мм	160/4	140/6	170/7
Суточный максимум осадков, мм	32/1	31/1.4	32/0
Число дней с осадками ≥ 5 мм, дни	30/0	28/1.2	28/1.5
Число дней с осадками ≥ 10 мм, дни	11/0.3	10/0.5	9/0.6
Максимальная продолжительность периода без осадков, дни	12/-0.1	11/0.2	12/0.5
Максимальная продолжительность периода с осадками, дни	9/-0.6	8/0.4	9/0.6
Число периодов без осадков продолжительностью 1-5 дней	35/0	35/0.3	35/0
Число периодов с осадками продолжительностью 1-5 дней	33/0	32/0.6	31/0.3
Число периодов без осадков продолжительностью 6-10 дней	3/0.6	3/0	3/0
Число периодов с осадками продолжительностью 6-10 дней	4/0.2	4/0	4/-0.2

В рамках настоящих исследований анализировались градации «сильный дождь» (осадки не менее 35 мм за период не более 12 часов) и «очень сильный дождь» (не менее 50 мм продолжительностью не более 12 ч). Для территории Томской области данные градации относятся к комплексу неблагоприятных (≥ 35 мм) и опасных (≥ 50 мм) явлений (Перечень и критерии..., 2021). Осадки с данными градациями наблюдаются крайне редко и были зафиксированы в отдельные годы в период с мая по август. Среднее многолетнее число случаев с сильным дождем ≥ 35 мм/12 часов за весь период исследования составило от 0.1 дня до 0.3, число случаев с очень сильным дождем ≥ 50 мм/12 часов – 0.1 дня. При анализе повторяемости сильных осадков на станциях Томской области в различные временные интервалы обнаружено, что в период наиболее значительных скоростей глобального

потепления (после 1976 года) наблюдается также максимальное число повторности опасных явлений (Титовская, Волкова, 2019). Таким образом, тенденции повышения температуры воздуха и осадков на территории Томской области сопровождаются и ростом повторяемости опасных явлений, обусловленных осадками, что необходимо учитывать в работе транспортной отрасли региона.

При анализе продолжительности и периодичности выпадения осадков с апреля по октябрь (максимальная непрерывная продолжительность, количество периодов без осадков продолжительностью 1-5 и 6-10 дней и тенденции их изменения) установлено, что за рассматриваемые 50 лет периоды «без осадков» вдвое превышают количество периодов «с осадками». Максимальная непрерывная продолжительность периодов без осадков в целом выше продолжительности периодов с зарегистрированными осадками. На большей части области (за исключением северной части) наблюдается тенденция к увеличению максимальной продолжительности как периодов с осадками, так и без осадков со скоростью до 0.8 дня/10 лет. Частота кратковременных периодов с осадками (1-5 дней) увеличилась в центральной части области, а продолжительных сухих периодов (6-10 дней) — выросла на севере.

Таким образом, рост осадков и связанных с ними экстремальных событий фиксируются в южной и центральной частях области, что необходимо учитывать как при проектировании новых дорог, так и при эксплуатации действующих.

Характеристики снежного покрова

Характеристики снежного покрова важны для оценки возможных снегопереносов и обустройства зимников — автодорог, подходящих для эксплуатации лишь в холодный период года. Знание высоты снежного покрова и продолжительности его залегания важны при выполнении комплекса мероприятий по обеспечению безопасного и бесперебойного движения на автомобильных дорогах в зимний период, включающий очистку и защиту от снежных заносов, предупреждение и устранение зимней скользкости.

Средняя по области высота снежного покрова составляет 35-45 см, максимальная 80-90 см. В северной части области наблюдается ее уменьшение, в южной — увеличение. Продолжительность залегания снежного покрова в Томской области в среднем составляет 180 дней, но в последние 30 лет наблюдается ее сокращение в центральной и южной частях области (табл. 4). Тенденции изменчивости климатических характеристик снежного покрова примерно одинаковы, как за период 60 лет, так и за последнее тридцатилетие.

На большей части территории, где расположены зимники Томской области, значительных изменений характеристик снежного покрова не выявлено. Наблюдаемое уменьшение продолжительности залегания снежного покрова со скоростью 2 дня за 10 лет, существенное влияние в ближайшей перспективе вряд ли окажет.

Таблица 4. Характеристики снежного покрова и их тенденции за разные периоды лет

Table 4. Snow cover characteristics and their trends over different periods of the years

Характеристики снежного покрова	Среднее пери- ода 1990-2019 гг./ тенденция	Средние значения периода 1960-2019 гг./ тенденции		
		Северная часть	Центральная часть	Южная часть
Высота средняя (см)/ тенден- ция (см /10 лет)	39/1	38/-2	45/0	38/4
Высота максимальная (см) / тенденция (см /10 лет)	81/-2	88/-4	77/0	94/1
Высота абсолютный макси- мум (см) / тенденция (см /10 лет)	104/-1	115/-4	106/0	115/1
Продолжительность залега- ния снежного покрова (дни) / тенденция (дней за 10 лет)	175/-2	197/0	172/-2	175/-1

Повторяемость гололедно-изморозевых явлений

Изменения температурного режима и режима осадков оказывают огромное влияние на повторяемость гололедно-изморозевых явлений (ГИЯ) (синоним: гололедно-изморозевые отложения – ГИО). Образование зимней скользкости зависит от свойств дорожного покрытия и погодных условий. Наиболее опасными считаются отложения в виде гололеда (ГЛ), оледенелого мокрого снега (ОМС), зернистой (ИЗ) и кристаллической изморози (ИК). Гололедообразование начинается чаще всего при температуре воздуха от 0 до -6°C, реже при более низких температурах (до -10...-12°C). При резких потеплениях гололед может наблюдаться и при небольших положительных температурах (от 0 до +0.5°C). Образование зернистой изморози чаще всего наблюдается при температурах воздуха -1...-10°C. При более низких температурах (-12...-16°C) зернистая изморозь обычно наблюдается вместе с кристаллической. Кристаллическая изморозь наблюдается зимой в тихую, малооблачную погоду при высокой влажности и низких температурах воздуха (-10 до -30°C). *Оледенелый снег* образуется в результате замерзания талой воды в слое снега во время резких похолоданий после оттепелей. По величине отложения оледенелый мокрый снег часто превосходит гололед, поэтому является очень опасным видом обледенения.

Гололедные отложения могут серьезно осложнить работу не только сети автомобильных дорог, но и авиации: возникают проблемы при подготовке воздушных судов к полету, приеме и выпуске самолетов и вертолетов. При отложении льда на поверхности воздушного судна его вылет запрещается. При покрытии гололедом взлетно-посадочной полосы или рулежных дорожек происходит значительное уменьшение трения колес шасси о бетон, что затрудняет как разбег, так и пробег самолета. При посадке на обледенелую полосу при боковом ветре создается опасность уклонения самолета от нужного направления движения и выкатывания его за пределы взлетно-посадочной полосы.

Современный климат Томской области с наблюдающейся тенденцией к по-

теплению (Второй оценочный доклад..., 2014; Барашкова и др., 2015а; Барашкова и др., 2015b) обуславливает необходимость уточнения климатических характеристик ГИЯ – особенностей их пространственно-временная повторяемости и интенсивности. Особенно актуальны эти исследования для зимников, протяженность которых на территории области превосходит протяженность других трасс.

Изучение повторяемости гололедно-изморозевых явлений позволило выявить, что среднее число дней со всеми видами скользкости по территории области составляет 70-100 дней в году. Хотя наибольшее число дней со всеми видами скользкости зафиксировано на станции в юго-восточной части области в 2002 году и составило 144 дня, ГИЯ наиболее часто возникают в северной, малодоступной в транспортном отношении, части области. Наименьшее число ГИО отмечается в юго-восточных районах области. Наличие участков с повышенной скользкостью с высокой степенью вероятности присуща всем зимникам, расположенным на территории области и на протяжении всего времени их функционирования.

Наиболее часто по всей территории области образуется кристаллическая изморозь (от 30 до 80 дней за год), которая фиксируется в северных и центральных районах области, причем частота этого явления постепенно увеличивается. В южной части области повторяемость кристаллической изморози уменьшается. Продолжительность явления с вероятностью 90% не превышает 50 ч, а непрерывная продолжительность в 75% случаев составляла около суток. Повторяемость остальных видов ГИЯ не меняется от 1 до 10 дней.

Зернистая изморозь регистрируется разными станциями, в среднем, 8-20 дней году и наиболее часто в центральной части области, причем повторяемость ее растет. На юге области повторяемость явления демонстрирует тенденцию к уменьшению. Практическую ценность представляет информация о непрерывной продолжительности ГИЯ (рис. 4).

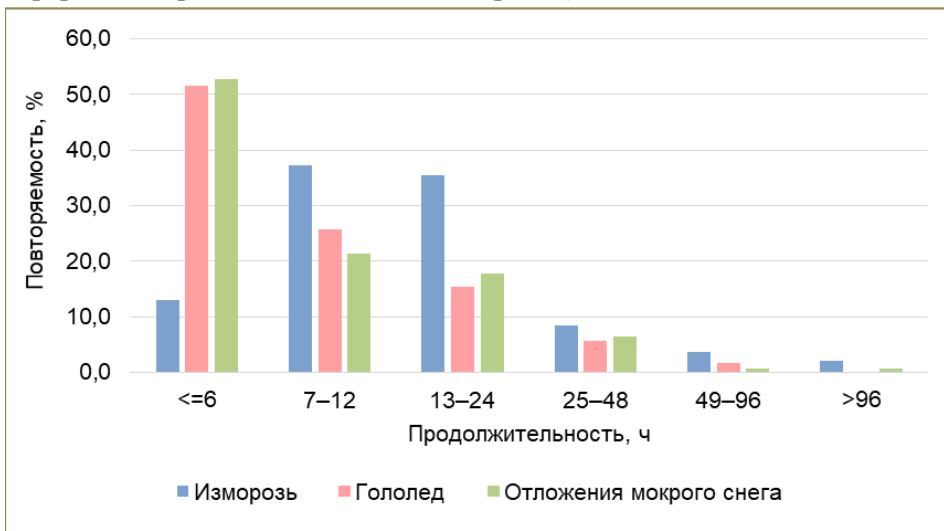


Рисунок 4. Непрерывная продолжительность случаев гололедно-изморозевых явлений

Figure 4. Non-stop duration of GI cases

Наиболее распространенная продолжительность отложений изморози составляет 7-12 часов, гололеда и отложений мокрого снега – в пределах 6 часов.

Повторяемость случаев с гололедицей требует отдельного внимания, поскольку она наблюдается на дорогах и представляет опасность для автомобильного транспорта. Гололедица образуется в результате замерзания воды или растворов при понижении температуры поверхности дороги ниже 0°C. Чаще всего гололедица на автомобильных дорогах образуется при температуре воздуха -2...-6°C.

Анализ данных о гололедице, с которой связано, как правило, более 50% всех дорожно-транспортных происшествий, очень важен, но изучить ее повторяемость было возможно только для южной части области. На большей части территории Томской области регистрация гололедицы отсутствует. Поскольку именно южная часть территории характеризуется наибольшими транспортными нагрузками, то информация о ее повторяемости крайне актуальна. В разные годы повторяемость гололедицы изменялась от 14 до 122 дней. Продолжительность гололедицы в 60% случаев составляла 49 ч, в 92% случаев не превышала 235 ч (10 суток). На фоне меняющегося климата ее регистрация должна быть предусмотрена на участках интенсивного дорожного движения.

В последнее десятилетие скорость изменения повторяемости разных ГИО имеет разную направленность: число дней, когда регистрируется зернистая изморозь – увеличивается на большинстве станций, гололеда и кристаллическая изморозь – уменьшается. В областном центре (г. Томск) повторяемость всех видов ГИО в последние годы уменьшается.

Непрерывная продолжительность гололеда и зернистой изморози в большинстве случаев не превышает 1 суток, максимальная – 2 суток; кристаллической изморози и отложений мокрого снега – 2 и 4 суток; гололедицы – 2 и 10 суток соответственно.

На территории Томской области преобладают отложения с диаметром более 10 мм, но, в основном, они не превышают 16 мм. Ранее «толщина стенки гололеда» изменялась в пределах 3-5 мм. В сложившемся климате диаметр гололедных отложений существенно увеличился и может достигать 30-40 мм. Толщина отложений изморози, как правило, не превышает 4 мм с максимумом до 9 мм.

Это необходимо учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации дорожных покрытий. Кроме того, при дорожном строительстве на территории области рекомендуется увеличить сеть регистрации гололедно-изморозевых явлений.

Климатологические аспекты изменения величины снегопереноса

Снежные заносы являются результатом воздействия метелей – переноса снега ветром в горизонтальном направлении во время снегопадов или поднятием снега с поверхности снежного покрова. Интенсивность снегопереноса, оказывающего большие помехи в функционировании зимников, зависит от

высоты снежного покрова и частоты повторения скоростей ветра 7 м/с и более, вызывающих метели. Обычно объем переносимого снега оценивается за период, при котором высота снега не менее 10 см. Таким образом, оценить перспективу увеличения/уменьшения снегопереноса по дорогам Томской области в ближайшем будущем, можно при помощи изучения многолетней динамики скорости ветра и характеристик снежного покрова.

Кроме участия в формировании снегопереноса, воздействие сильных ветровых нагрузок увеличивает вероятность аварий на автомобильном транспорте вследствие изменения траектории движения автомобиля. В этом отношении опасность представляет ветер со скоростью 12 м/с и более. В Томской области ветер 12 м/с и более отмечается 60-90 дней в году. На территории центральной части Томской области, особенно в ее западной части, число дней с такими скоростями может достигать 100. Заметим (рис. 1), что на этих территориях расположена большая часть зимников, следовательно, здесь воздействие ветровых нагрузок в совокупности с высотой снежного покрова, достигающей 40-50 см (Горбатенко и др., 2018), обеспечивает высокую вероятность формирования снежных заносов.

Однако необходимо отметить, что в последние десятилетия наметилась устойчивая тенденция уменьшения скорости ветра. Например, число дней со скоростью ветра 15 м/с и более, за период глобального потепления сократилось на 50-70%, варьируя по территории в диапазоне 5-15 дней. Следствием уменьшения доли высоких скоростей ветра является уменьшение повторяемости метелей. За последние три десятилетия в 2-3 раза сократились как число дней с метелью, так и их средняя продолжительность (Журавлев и др., 2019). Скорость уменьшения суммарной длительности метелей составляет 65 часов/10 лет, следовательно, и объем переносимого снега в XXI веке существенно снизился.

Основные результаты

Получены две группы климатических характеристик: тенденции одних усложняют развитие транспортной системы, тенденции других – благоприятствуют. Оказывают негативное воздействие и усложняют развитие транспорта:

- Увеличивающаяся экстремальность климата, требующая увеличения стойкости дорожных покрытий.
- Смещение дат устойчивого перехода средних суточных температур воздуха через 0 и 5°C. Весной смещение переходит на более ранние сроки, а осенью на более поздние, что уменьшает период использования «зимников». Увеличивается и частота опасных для всех видов транспорта переходов через 0°C, которые стали наблюдаться и зимой.
- Повсеместный рост годового количества атмосферных осадков на величину от 5 мм/10 лет до 20 мм/10 лет. Уменьшение кратковременных периодов с осадками (продолжительностью 1-5 дней) и увеличение более продолжительных (6-10 дней). Учитывая, что увеличилась, в основном, доля ливневых

осадков, следует ожидать роста частоты затопления территорий, образования новых оврагов, оползней, провалов грунта. В городах это повлечет за собой затруднение работы транспорта.

- Увеличение средней продолжительности периодов и числа дней с возможными случаями образования зимней скользкости (с вероятностью 95%). Такое увеличение особенно заметно в северных районах области, где актуально строительство новых дорог.

Благоприятными для развития транспортной системы являются:

- Уменьшение ветровых нагрузок, ввиду уменьшения повторяемости сильных ветров. Число дней с ветром 15 м/с и более, за период глобального потепления сократилось на 70-80%, варьируя по территории в диапазоне 5-15 дней.

- Сокращение числа метелей и их продолжительности в 1.5-2 раза.

- Уменьшение продолжительности залегания снежного покрова, обусловленное изменением сроков залегания и разрушения, которые способствуют уменьшению снегоприноса, затрудняющего функционирование дорог.

Из анализа совокупности факторов можно утверждать, что изменения климата не становятся более благоприятными для развития транспортной системы Томской области. Необходимо усиливать меры по увеличению стойкости дорожных покрытий по всей территории области. Вероятно, более быстрое разрушение дорожных покрытий, чем было в предыдущий климатический период. Кроме того, необходимо отметить явно недостаточное количество пунктов наблюдений (не более 23) за гололедными явлениями для качественного обслуживания хозяйственного комплекса области с общей площадью 314 391 км², особенно с учетом стратегии развития нефтегазовой отрасли и её дорожного, трубопроводного и электрического обеспечения.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p_a.

Список литературы

Барашкова, Н.К., Волкова, М.А., Кужевская, И.В. (2014) Оценка термического режима воздуха и тенденций процессов антициклогенеза на юге Западной Сибири в прикладных целях, *Вестник Томского государственного университета*, № 387. с. 225-232.

Барашкова, Н.К., Волкова, М.А., Кужевская, И.В. (2015a) Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области, *Труды Главной геофизической обсерватории*, вып. 576, с. 129-152.

Барашкова, Н.К., Кужевская, И.В., Носырева, О.В. (2015b) Климатические характеристики режимов устойчивого перехода температуры воздуха через определенные пределы на юге Западной Сибири, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 1, с. 87-97.

Волкова, М.А., Ивашкова, О.А., Чередыко, Н.Н. (2013) Особенности формирования и социально-экономические последствия температурных рисков в Томской области, *Вестник Томского государственного университета*, № 374, с. 180-187.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014) Под ред. В.В. Ясюкевич, В.А. Говоркова, М., Росгидромет, 1009 с., электронный ресурс, URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (дата обращения 28 сентября 2021).

Горбатенко, В.П., Громницкая, А.А., Константинова, Д.А., Ершова, Т.В., Нечепуренко, О.В. (2015) Оценка роли климатических факторов в возникновении и распространении лесных пожаров на территории Томской области, *Вестник Томского государственного университета*, № 395, с. 233-243.

Горбатенко, В.П., Журавлев, Г.Г., Носырева, О.В., Волкова, М.А., Кижнер, Л.И., Константинова, Д.А. (2018) Современные изменения климатических условий, определяющих накопление снега на автомобильных дорогах Томской области, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 4, с. 39-54.

Горбатенко, В.П., Кижнер, Л.И. (2014) Экономические аспекты использования агрометеорологических прогнозов, *Экономика сельского хозяйства России*, № 4, с. 54-61.

Евсеева, Н.С. (2001) *География Томской области. Природные условия и ресурсы*, Томск, ТГУ, 223 с.

Журавлев, Г.Г., Горбатенко, В.П., Тунаев, Е.Л. (2019) Метели на территории Томской области, *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, № 594, с. 137-151.

Кижнер, Л.И., Барашкова, Н.К., Носырева, О.В. (2021) Пожарная опасность в лесах Томского региона: климатический фактор и экономические риски, *Геосферные исследования*, № 2, с. 110-119.

Кужевская, И.В., Поляков, Д.В., Волкова, М.А., Барашкова, Н.К. (2015) Температурные волны тепла как отражение изменчивости современных климатических условий жизнедеятельности на территории Томской области, *Экология человека*, № 2, с. 3-9.

Огурцов, Л.А., Чередыко, Н.Н., Волкова, М.А., Журавлев, Г.Г. (2016) Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири, *Оптика атмосферы и океана*, т. 29, № 8, с. 633-639.

Перечень и критерии опасных гидрометеорологических явлений для территории обслуживания Западно-Сибирского УГМС, электронный ресурс, URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115> (дата обращения 28 сентября 2021).

Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики (2008) Под ред. Н.В. Кобышевой, СПб, АСТЕРИОН, 334 с.

Стратегия развития транспортной системы Томской области в 2008-2025 годах, электронный ресурс, URL: <https://storage.strategy24.ru/files/uploads/b3c984a857de6578f6108487eba4cb68.pdf> (дата обращения 28 сентября 2021).

Титовская, А.А., Волкова, М.А. (2019) Пространственно-временная характеристика прикладных показателей атмосферных осадков на территории Томской области, *Тезисы докладов российской конференции «XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу»*, Томск, Аграф-Пресс, с. 124-125.

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года, электронный ресурс, URL: <http://government.ru/docs/all/66349/> (дата обращения 5 сентября 2018).

Dobney, K., Baker, C.J., Quinn, A.D., Chapman, L. (2009) *Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom*, available at: <http://online-library.wiley.com/doi/10.1002/met.114/pdf> (accessed 10 November 2021).

Gorbatenko, V.P., Volkova, M.A., Nosyreva, O.V., Zhuravlev, G.G., Kuzhevskaya, I.V. (2020) Influence of Climatic Conditions on Western Siberian Forest Fires. Chapter 12, *Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks*, USA, IGI Global, pp. 269-293.

Kostianaiia, E.A., Kostianoy, A.G., Scheglov, M.A., Karelov, A.I., Vasileisky, A.S. (2021) Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport, *Transport and Telecommunication*, vol. 22, no. 2, pp. 183-195.

Nemry, F., Demirel, H. (2012) *Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures*, available at: <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC72217.pdf> (accessed 10 November 2021).

Palco, K., Lemmen, D.S. (2017) *Climate risks and adaptation practices for the Canadian transportation sector*. Ottawa, ON: Government of Canada, available at: <http://www.nrcan.gc.ca/environment/impacts-adaptation> 10761 (accessed 10 November 2021).

References

Barashkova, N.K., Volkova, M.A., Kuzhevskaya, I.V. (2014) Ocenka termicheskogo rezhima vozduha i tendencij processov anticiklogeneza na yuge Zapadnoj Sibiri v prikladnyh celyah [Assessment of the thermal regime of air and tendencies of anticyclogenesis processes in the south of Western Siberia for applied purposes], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 387, pp. 225-232.

Barashkova, N.K., Volkova, M.A., Kuzhevskaya, I.V. (2015a) Sovremennyy klimaticheskij rezhim atmosferyh osadkov na territorii Tomskoj oblasti [The current climatic regime of atmospheric precipitation in the Tomsk region], *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii*, vol. 576, pp. 129-152.

Barashkova, N.K., Kuzhevskaya, I.V., Nosyreva, O.V. (2015b) Klimaticheskie karakteristiki rezhimov ustojchivogo perekhoda temperatury vozduha cherez opredelennye predely na yuge Zapadnoj Sibiri [Climatic characteristics of the regimes of stable transition of air temperature through certain limits in the south of Western Siberia], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, no. 1, pp. 87-97.

Volkova, M.A., Ivashkova, O.A., Chered'ko, N.N. (2013) Osobennosti formirovaniya i social'no-ekonomicheskie posledstviya temperaturnyh riskov v Tomskoj oblasti [Features of the formation and socio-economic consequences of temperature risks in the Tomsk region], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 374, pp. 180-187.

Vtoroi ozenozhnii dolad Rosgidrometa ob izmeneniach klimata I ich posledstviach na territorii Rossijskoj Federazii. Technicheskoe resume [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation] (2014) Moscow, Russia, 1009 p., URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (accessed 28 September 2021).

Gorbatenko, V.P., Gromnickaya, A.A., Konstantinova, D.A., Ershova, T.V., Nechepurenko, O.V. (2015) Ocenka roli klimaticheskikh faktorov v vozniknovenii i rasprostranении lesnyh pozharov na territorii Tomskoj oblasti [Assessment of the role of climatic factors in the occurrence and spread of forest fires in the Tomsk region], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 395, pp. 233-243.

Gorbatenko, V.P., Zhuravlev, G.G., Nosyreva, O.V., Volkova, M.A., Kizhner, L.I., Konstantinova, D.A. (2018) Sovremennye izmeneniya klimaticheskikh uslovij, opredelyayushchih nakoplenie snega na avtomobil'nyh dorogah Tomskoj oblasti [Present-day changes of climatic conditions determining the accumulation of snow at the motor roads of Tomsk region], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 4, pp. 39-54.

Gorbatenko, V.P., Kizhner, L.I. (2014) Ekonomicheskie aspekty ispol'zovaniya agrometeorologicheskikh prognozov [Economic aspects of using agrometeorological forecasts], *Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii*, no. 4, pp. 54-61.

Evseeva, N.S. (2001) *Geografiya Tomskoj oblasti. Prirodnye usloviya i resursy* [Geography of the Tomsk region], Tomsk, Russia, 223 p.

Zhuravlev, G.G., Gorbatenko, V.P., Tunaev, E.L. (2019) Meteli na territorii Tomskoj oblasti [Snowstorms in the Tomsk Region], *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova*, no. 594, pp. 137-151.

Kizhner, L.I., Barashkova, N.K., Nosyreva, O.V. (2021) Pozharnaya opasnost' v lesah Tomskogo regiona: klimaticheskij faktor i ekonomicheskie riski [Fire hazard in forests of the Tomsk region: climatic factor and economic risks], *Geosfernye issledovaniya*, no. 2, pp. 110-119.

Kuzhevskaya, I.V., Polyakov, D.V., Volkova, M.A., Barashkova, N.K. (2015) Temperaturnye volny tepla kak otrazhenie izmenchivosti sovremennyh

klimaticheskikh usloviy zhiznedeyatel'nosti na territorii Tomskoj oblasti [Temperature heat waves as a reflection of the variability of modern climatic conditions of life on the territory of the Tomsk region], *Ekologiya cheloveka*, no. 2, pp. 3-9.

Ogurcov, L.A., Chered'ko, N.N., Volkova, M.A., Zhuravlev, G.G. (2016) Dinamika pokazatelej ekstremal'nosti klimata na territorii Zapadnoj Sibiri [Dynamics of climate extremity indicators on the territory of Western Siberia], *Optika atmosfery i oceana*, vol. 29, no. 8, pp. 633-639.

Perechen' i kriterii opasnykh gidrometeorologicheskikh yavlenij dlya territorii obsluzhivaniya Zapadno-Sibirskogo UGMS [List and criteria of hazardous hydrometeorological phenomena for the service area of the West Siberian UGMS], available at: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115> (accessed 28 September 2021).

Rukovodstvo po specializirovannomu klimatologicheskomu obsluzhivaniyu ekonomiki [A Guide to dedicated climatological services to the economy] (2008) In N.V. Kobysheva (ed.), Saint Petersburg, Russia, 334 p.

Strategiya razvitiya transportnoj sistemy Tomskoj oblasti v 2008-2025 godah [Development strategy of the transport system of the Tomsk region in 2008-2025], available at: <https://storage.strategy24.ru/files/uploads/b3c984a857de6578f6108487eba4cb68.pdf> (accessed 28 September 2021).

Titovskaya, A.A., Volkova, M.A. (2019) Prostranstvenno-vremennaya harakteristika prikladnykh pokazatelej atmosferynykh osadkov na territorii Tomskoj oblasti [Spatial and temporal characteristics of applied indicators of atmospheric precipitation in the territory of the Tomsk region.], *Tezisy dokladov rossiyskoy konferentsii «XIII Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu»* [Abstracts of the Russian conference «XIII Siberian meeting and school of young scientists on climate and environmental monitoring»], Tomsk, Russia, pp. 124-125.

Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federacii na period do 2030 goda [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030], available at: <http://government.ru/docs/all/66349/> (accessed 28 September 2021).

Dobney, K., Baker, C.J., Quinn, A.D., Chapman, L. (2009) *Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom*, available at: <http://online-library.wiley.com/doi/10.1002/met.114/pdf> (accessed 10 November 2021).

Gorbatenko, V.P., Volkova, M.A., Nosyreva, O.V., Zhuravlev, G.G., Kuzhevskaya, I.V. (2020) Influence of Climatic Conditions on Western Siberian Forest Fires. Chapter 12, *Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks*, USA, IGI Global, pp. 269-293.

Kostianaiia, E.A., Kostianoy, A.G., Scheglov, M.A., Karelov, A.I., Vasileisky, A.S. (2021) Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport, *Transport and Telecommunication*, vol. 22, no. 2, pp. 183-195.

Nemry, F., Demirel, H. (2012) *Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures*, available at: <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC72217.pdf> (accessed 10 November 2021).

Palco, K., Lemmen, D.S. (2017) *Climate risks and adaptation practices for the Canadian transportation sector. Ottawa, ON: Government of Canada*, available at: <http://www.nrcan.gc.ca/environment/impacts-adaptation> 10761 (accessed 10 November 2021).

Статья поступила в редакцию (Received): 10.09.2021.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 20.09.2021.

Принята к публикации (Accepted): 06.11.2021.

Для цитирования / For citation:

Горбатенко, В.П., Волкова, М.А., Носырева, О.В., Кузевская, И.В. (2021) Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 4, с. 71-95, doi:10.21513/2410-8758-2021-4-71-95.

Gorbatenko, V.P., Volkova, M.A., Nosyreva, O.V., Kuzhevskaya, I.V. (2021) Modern trends in climatic characteristics affecting the development of the transport system of the Tomsk region, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 4, pp. 71-95, doi:10.21513/2410-8758-2021-4-71-95.