

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

А. С. Лохов, Е. И. Котова, В. Г. Чибисова

Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Для цитирования

Лохов А. С., Котова Е. И., Чибисова В. Г. Определение границ климатических сезонов для параметризации модели переноса атмосферных эмиссий на территории российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 27—36. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-27-36.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2024 г.

Выделены границы климатических сезонов для территории российской Арктики. Зимний сезон определен как период с установившимся снежным покровом, летний — как активный вегетационный период. Данные о снежном покрове представлены с метеостанций, а вегетационный период определялся по индексу NDVI на основе спутниковых снимков. Цель работы — определение границ сезонов в выбранных опорных точках для параметризации модели переноса примесей методом анализа траекторий. Для сравнения результатов в рассматриваемых опорных точках были рассчитаны границы климатических сезонов по показателю среднесуточной температуры по упрощенной методике без анализа трендов. Другая часть работы посвящена смежной задаче — сравнению временных границ зимнего сезона за 1991–2020 и 1961–1990 гг. По этим показателям построены карты-схемы с интерполяционными поверхностями и сделаны выводы о неравномерности их изменения на рассматриваемой территории.

Ключевые слова: перенос примесей в атмосфере, российская Арктика, климатический сезон, изменение климата в Арктике, установившийся снежный покров, вегетационный индекс NDVI, продолжительность зимы.

Введение

Одним из возможных методов для моделирования переноса различных атмосферных эмиссий является траекторный подход [1], заключающийся в усреднении данных о траекториях переноса воздушных масс для каждого климатического сезона по характерным для него периодам, например, средние траектории в январе — для зимы, в июле — для лета. В качестве примера применения этой методики можно привести работу [2], посвященную расчету атмосферного переноса черного углерода в российскую Арктику. Применительно к арктическим территориям, где снежный покров может сохраняться до 200, а в отдельных районах до 300 дней в году, использование фиксированных месяцев, характеризующих весь сезон, может вносить некоторую погрешность. Например, апрель в Арктике может быть климатически зимним месяцем, но использоваться как характеризующий весенний период.

Цель работы — определение границ климатических сезонов для параметризации модели переноса атмосферных эмиссий, где с их помощью определяются коэффициенты скорости осадения примесей на поверхность [3]. Помимо этого полученные результаты позволяют судить об изменении продолжительности климатических сезонов во времени.

В научной литературе климатические сезоны принято выделять, исходя из показателей среднесуточной температуры, например, Н. В. Рутковская предложила следующие границы сезонов для умеренного климата: весна — выше -3°C , лето — выше 10°C , осень — ниже 10°C , зима — ниже -3°C [4]. Существуют и другие точки зрения. J. Jaagus и др. предложили для Восточно-Европейской равнины следующие границы [5]: весна — выше 0°C , лето — выше 13°C , осень — ниже 13°C , зима — ниже 0°C . Необходимо отметить, что указанные авторы выделяют большее количество сезонов, в первом случае 12, во втором 6, здесь же приведены границы лишь

для четырех основных, что достаточно для поставленной в работе цели.

Естественно, для других климатических поясов границы могут существенно отличаться. В Китае, расположенном в субэкваториальном, субтропическом и умеренном поясах, В. Ма и др. [6] выделяют следующие сезоны по показателю среднесуточной температуры для всей территории страны: весна — выше 10°C, лето — выше 22°C, осень — ниже 22°C, зима — ниже 10°C. В таком случае в северо-восточной части Китая, относящейся к умеренному поясу, лето отсутствует, и этот регион отмечен авторами как «No-summer region».

Помимо климатических выделяют также понятия циркуляционных и синоптических сезонов — это части года, отличающиеся определенными типами общей циркуляции атмосферы по классификации Б. Л. Дзержевского [7]. Первые из них определяются для северного полушария, тогда как вторые для локальных областей. С точки зрения поставленной задачи цельная характеристика атмосферных процессов намного более применима, но возникают некоторые проблемы с конкретными областями, а также со сложностью их выделения.

В [8] для выделения сезонов применен другой подход, основанный на методах математической статистики. В нем сезоны выделяются исходя из анализа значений некоторых климатических показателей (в данной конкретной работе — среднемесячной температуры), а именно их отклонения от математического ожидания (среднегодовой температуры). Это позволяет выделять сезоны в любых климатических поясах без привязки к конкретным температурам. К задаче параметризации модели, рассматриваемой в настоящей работе, этот метод не применим, так как среднегодовая температура варьируется в широких пределах, но он имеет высокое фундаментальное значение. Возможно, его дальнейшее улучшение, например, при использовании в качестве опорной точки не среднегодовой температуры, а средних за несколько периодов нефиксированной продолжительности, выделяемых путем поиска выборок с минимальной дисперсией, позволит приблизиться к более классическому пониманию сезонов года, но этот вопрос требует существенной проработки.

Некоторые авторы выделяют переменное количество сезонов, так, в [9] рассмотрено определение дат естественных климатических сезонов, под которыми понимают «периоды времени года, характеризующиеся однотипным ходом метеорологических процессов и определенным термическим режимом» для 5 станций на островных территориях евразийской Арктики, количество которых составило от 7 до 10.

Подобного рода проблемы с возможным отсутствием некоторых сезонов, в зависимости от их определения существуют и для субполярного и полярного поясов, поэтому деление по среднесуточной температуре не всегда дает необходимые границы с точки зрения процесса осаждения атмосферного

аэрозоля. В данном случае для переходов зима-весна и осень-зима намного более показательным будет являться наличие установившегося снежного покрова, а активный вегетационный период растений может служить индикатором переходов весна-лето и лето-осень.

Далее под зимним периодом мы будем понимать временной интервал, в котором на рассматриваемой территории присутствует установившийся снежный покров, под летним — временной интервал с активной вегетацией растений, а весна и осень — это переходные периоды между ними.

Под установившимся или устойчивым снежным покровом обычно понимают интервал не менее 30 дней подряд с перерывом не более 3 дней [10]. Существуют и более конкретизированные определения, так, коллектив авторов-составителей используемой в работе базы данных дает следующее определение (L_0 — значение показателя покрытия окрестности станции снежным покровом по десятибалльной шкале): «Периодом с устойчивым снежным покровом считается интервал времени не менее 30 дней подряд, в котором число случаев со значениями L_0 менее 6 баллов составляет не более 3 дней подряд или по отдельности. При этом в начале зимы игнорируется перерыв в 1 день (один случай с L_0 менее 6 баллов), если ему предшествовали не менее 5 дней со снежным покровом (L_0 больше 5 баллов), и перерыв в 2—3 дня подряд, если ему предшествовали не менее 10 дней со снежным покровом. В конце зимы игнорируются перерывы в 1 день или в 2—3 дня подряд, если за ними наблюдался снежный покров непрерывно не менее 5 или 10 дней соответственно» [11, табл. 8 и 9].

Информация об изменении границ климатических сезонов с годами позволяет судить об изменении климата. Массив анализируемых в работе данных позволил получить некоторые дополнительные результаты относительно продолжительности зимнего периода на территории всей российской Арктики.

Материалы и методы

Согласно решению Всемирной метеорологической организации (ВМО) ¹ для оценки изменений климата в качестве базового и стабильного периода используется промежуток 1961—1990 гг., следующим за ним является период 1991—2020 гг. Также рекомендуется обновлять последний период каждые 10 лет, т. е. дополнительно использовать промежуток 2001—2030 гг. В данной работе периоды 1958—1960 и 2021—2023 гг. были вынесены отдельно по причине небольшого количества данных.

Границы активного вегетационного периода

В экологии используется индекс биопродуктивности, определяющий способность экосистемы к воспроизводству органического вещества, он из-

¹ WMO-No. 49 Technical Regulations. Basic Documents No. 2. Vol. I. — General Meteorological Standards and Recommended Practices. Geneva, WMO, 2019, p. 71.

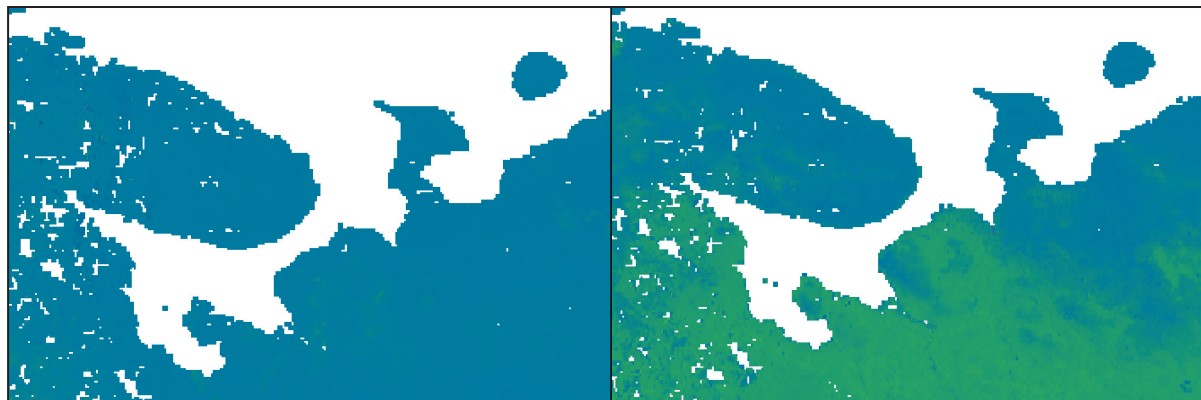


Рис. 1. Индекс NDVI для региона Белого моря за 01.05.2023 (слева) и 14.05.2023 (справа). По данным [13]
Fig. 1. NDVI Index for the White Sea Region for May 1, 2023 (left) and May 14, 2023 (right). According to [13]

меряется в единицах массы на площадь в единицу времени (т/га в год). Существует также его аналог, основанный на данных дистанционного зондирования Земли, менее точный в масштабе локальной исследовательской площадки, но более точный в масштабах планеты с учетом временных изменений. Это индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный разностный индекс растительности, или вегетационный индекс [12]. Он основан на принципах поглощения и отражения растительностью света с различными длинами волн. Пигмент хлорофилл поглощает свет в видимом диапазоне, и максимум этого поглощения приходится на красную часть спектра. С другой стороны, растения отражают свет в ближней инфракрасной области спектра. На этом отношении основан индекс, который вычисляется по формуле

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS},$$

где NIR — отраженное излучение в ближнем инфракрасном диапазоне (длина волны в пределах 730—1000 нм); VIS — отраженное излучение в видимом спектре (длина волны в пределах 550—700 нм).

Индекс изменяется в диапазоне от –1 до 1, отрицательные значения он принимает для снежного, водного и искусственных покровов, а значения для открытой почвы близки к нулю. Для редкой и густой растительности индекс может принимать значения 0,3—0,5 и свыше 0,7 соответственно.

NDVI рассчитывается на основе спутниковых снимков с наличием инфракрасного канала; для настоящей работы использовался архив таких данных с 1981 г. [13] с пространственным разрешением 0,05×0,05° и практически ежедневной дискретностью. Пример данных из этого набора для региона Белого моря приведен на рис. 1, белым цветом отмечены отрицательные значения, синим — значения до 0,3, зеленым — свыше 0,3.

Недостатком этого индекса является чувствительность к метеоусловиям, но существуют различные

его модификации, призванные решить как эту, так и некоторые другие проблемы. Кроме того, недостатки компенсируются практически ежесуточной частой измерений, что дает широкие возможности для различных усреднений по периодам.

За начало вегетационного периода было принято появление на территории или в окрестности точки стабильных, не единичных значений индекса NDVI более 0,3. Выделение границ производилось визуально на основе обработанных растровых изображений со значениями индекса. Из-за проблем с облачностью не всегда удавалось определить дату начала вегетационного периода с точностью до дня, в данном случае полученный интервал усреднялся.

Границы периода с установившимся снежным покровом

Для выделения границ зимнего периода была использована база данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [14]. Она предоставляет ежесуточные данные о состоянии снежного покрова на 620 метеостанциях с 1958 по 2023 гг. Параметром выделения границ является степень покрытия окрестности станции снегом, варьирующаяся в данной базе от 0 до 10 баллов².

В Арктике периоды залегания снежного покрова более стабильны в сравнении с территориями, расположенными южнее. В то же время с точки зрения моделирования атмосферного переноса примесей нестабильные периоды при становлении и оттаивании снежного покрова лучше отнести к весне и осени, так как в это время могут наблюдаться осадки различных типов. Поэтому авторы приняли более строгое определение периода с установившимся снежным покровом относительно перерывов в его залегании — наличие снежного покрова не менее 30 суток с показателем покрытия, равным 10, и вы-

² Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. — Вып. 3. — Ч. 1: Метеорологические наблюдения на станциях. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 301 с.

Таблица 1. Краткая статистическая характеристика выборки данных
Table 1. Summary statistical characteristics of the data sample

Показатель	Граница зима-весна				Граница осень-зима			
	1958— 1960	1961— 1990	1991— 2020	2021— 2023	1958— 1960	1961— 1990	1991— 2020	2021— 2023
Минимум	1 мар	16 фев	17 фев	24 фев	14 сен	23 авг	30 авг	16 сен
Максимум	2 июл	9 июл	7 июл	20 июн	25 дек	25 дек	25 дек	23 дек
Среднее	4 май	4 май	1 май	27 апр	22 окт	20 окт	24 окт	27 окт
Медиана	5 май	4 май	1 май	30 апр	14 окт	17 окт	19 окт	26 окт
Стандартное отклонение	21,3	20,5	18,9	16,2	23,2	21,0	22,0	18,9
Дисперсия выборки	452,7	421,4	358,9	262,7	537,7	440,2	482,1	358,5
Размер выборки	155	4961	4721	437	321	5054	4796	316

деление его границ при отличном от 10 значении в течение не менее суток (одна запись в соответствии с дискретностью БД), т. е. периоды с наличием каких-либо подтаек, нарушающих целостность снежного покрова, не учитывались. Пропуски в базе данных по причине их выбраковки или отсутствия не являются перерывами в его залегании и поэтому игнорировались.

Необходимо отметить возможную неопределенность, возникающую при одновременном отсутствии снежного покрова и наличии отрицательных среднесуточных температур. С точки зрения установившегося снежного покрова эти периоды не являются зимними в отличие от определения сезонов по среднесуточной температуре. Из-за этих фактов при сравнении данных двух типов может возникать некоторая погрешность.

Из всего набора данных были проанализированы метеостанции, расположенные севернее 60° с. ш., а также одновременно севернее 58° с. ш. и восточнее 150° в. д., что составило 182 метеостанции с 5,7 млн строк ежесуточных измерений показателей снежного покрова. Не все эти территории можно отнести к Арктике по различным определениям, такая избыточность данных обусловлена построением более качественной интерполяционной поверхности.

Путем описанных выше операций было выделено более 20 тыс. записей границ сезонов зима-весна и осень-зима. В базе данных имеются некоторые недостатки — часть данных выбракована, изредка присутствуют пропуски, что при такой методике может сказаться на результатах подсчета. Чтобы этого избежать, была проведена фильтрация выбросов путем отсева значений, не лежащих в промежутке $\bar{x} \pm 2\sigma$, где \bar{x} — среднее значение по выборке; σ — среднеквадратическое отклонение. Для границ зима-весна и осень-зима этот интервал составил $121,0 \pm 74,5$ и $295,4 \pm 64,0$ дней соответственно. При пересчете в календарные дни без учета високосных годов это периоды с 15 февраля до

14 июля и с 19 августа до 25 декабря соответственно. Подобного рода фильтрация данных обусловлена нормальностью распределений и дает стандартный доверительный интервал 95%. Применительно к рассматриваемому набору данных это позволило отсеять 6,38% и 4,44% выбросных значений соответственно. Размер итоговой выборки для перехода зима-весна составил 10 274, а для перехода осень-зима — 10 487.

По аналогии с вегетационным индексом существует также и снежный — Normalized Difference Snow Index (NDSI) [15]. Он основан на тех же принципах, имеет схожие преимущества и недостатки и может использоваться для выделения границ периода с установившимся снежным покровом. Но при наличии большого количества данных с наземных метеостанций он теряет ряд преимуществ, поэтому в данной работе применен не был.

Границы периодов по среднесуточной температуре

Для сравнения полученных результатов были также рассчитаны границы четырех климатических сезонов года по показателю среднесуточной температуры. Расчет выполнен на основе базы данных ВНИИГМИ-МЦД [14] методами, аналогичными выделению по данным о снежном покрове. Периоды были выделены по следующим значениям среднесуточной температуры: весна — выше 0°C, лето — выше 10°C, осень — ниже 10°C, зима — ниже 0°C.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты обработки данных. В табл. 1 представлена описательная статистика анализируемой выборки. Она обрабатывалась в количестве дней от начала года и для удобства значения были переведены в даты без учета високосных годов (где для дат позднее 28 февраля необходимо прибавлять 1 день), стандартное отклонение и дисперсия указаны в количестве дней. В таблице приведены характеристики по общей для всех рассматри-

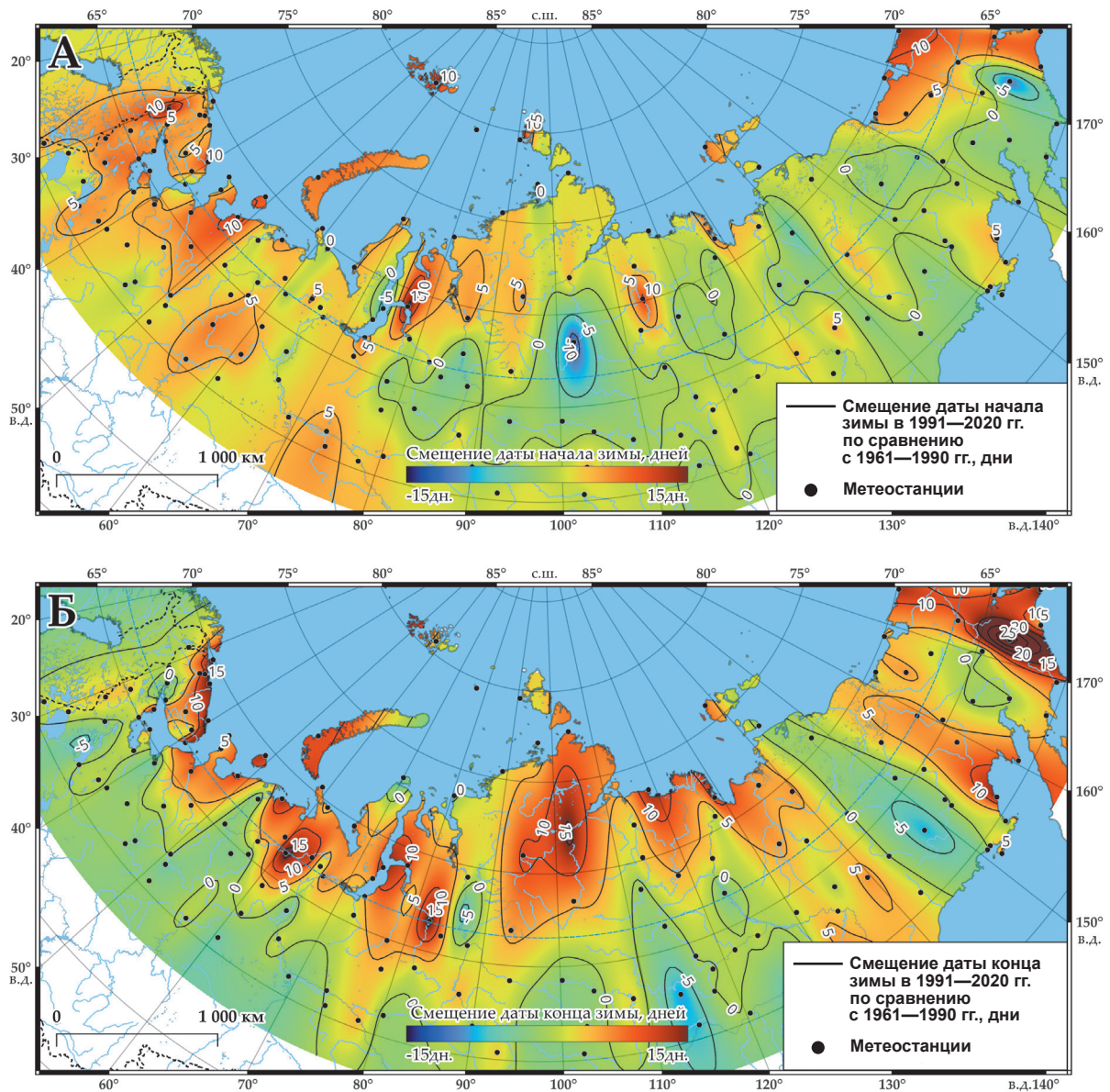


Рис. 2. Смещение границы перехода сезонов осень-зима (А) и зима-весна (Б) в 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. Положительные значения (красный цвет) – более позднее начало осени (А) и раннее начало весны (Б), отрицательные (синий цвет) – наоборот
 Fig. 2. Temporal shifts in the boundaries of seasonal transitions from autumn to winter (A) and winter to spring (B) in 1991–2020 compared to 1961–1990. Positive values (red color) denote a delayed onset of autumn (A) and an advanced onset of spring (B), negative values (blue color) – vice versa

ваемых метеостанций выборке, что дает довольно существенный разброс данных.

Наиболее поздняя средняя дата начала весны, 21–22 июня, отмечена на острове Русский в Карском море, станция там была закрыта в 1999 г. Самое раннее среднее за 1961–1990 гг. начало осени наблюдалось на острове Голомянный архипелага Северная Земля — 20 сентября, а за 1991–2020 гг. — также на острове Русский.

Для рассматриваемых интервалов была рассчитана разность средних дат начала и конца зимы. В 1991–2020 гг. относительно 1961–1990 гг. по всем рассматриваемым станциям весна начиналась

на 3,5 дня раньше, осень — на 3,1 дня позже. Если сравнивать 2021–2023 и 1991–2020 гг., данное изменение составило: весна — на 1,1 дня раньше, осень — на 3,4 дня позже, но необходимо отметить, что период в три года слишком мал для усреднения.

При сравнении основных промежутков выборки 1991–2020 гг. и 1961–1990 гг. на 128 станциях весна начиналась раньше, а на 51 — позже. В свою очередь, осень на 136 станциях начиналась позже, а на 40 — раньше. Таким образом, прослеживается явный тренд на уменьшение продолжительности зимнего периода с установившимся снежным покровом. На рис. 2

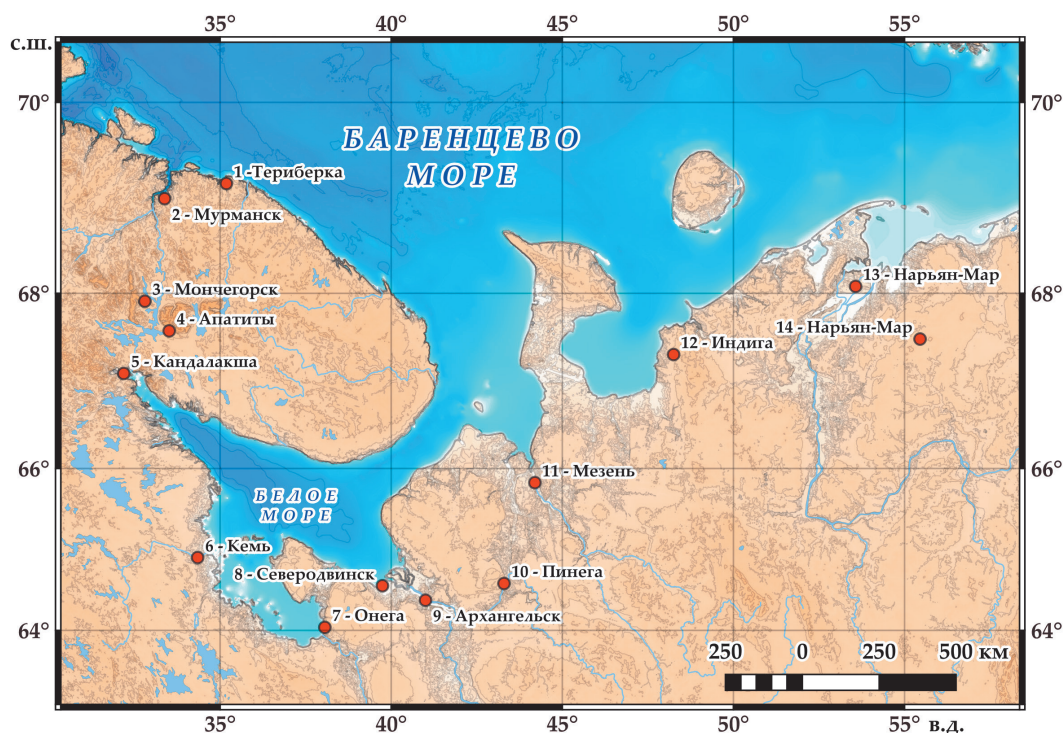


Рис. 3. Карта-схема расположения точек для определения границ климатических сезонов
 Fig. 3. Schematic map of the location of points for determining the boundaries of climate seasons

показаны интерполяционные поверхности, полученные в результате сравнения этих периодов. Согласно полученным данным, уменьшение продолжительности зимы в среднем составляет по всей территории российской Арктики до 10 дней за счет увеличения весны и до 15 дней — за счет осени. Наиболее ярко выраженное уменьшение зимы за счет увеличения весны наблюдается на прибрежных арктических территориях, тогда как увеличение осени сильнее прослеживается в европейской части России, чем в ее восточной части.

Согласно результатам [5], полученным исходя из данных о среднесуточной температуре по линейному тренду за 1881—1995 гг., в Архангельске средняя продолжительность весны и зимы уменьшилась на 1,9 и 9,8 дня, а лета и осени увеличилась на 3,4 и 7,6 дня соответственно.

Например, в Юганском заповеднике (Ханты-Мансийский автономный округ) на широте около 60° с. ш., по данным среднесуточной температуры (границы 0°C и 10°C), средняя продолжительность зимы в 1982—2016 гг. составила 182 дня, она наступала 19 октября и заканчивалась 19 апреля [16]. Указанные даты были приведены в соответствие с данной работой относительно включения крайних значений промежутков. Согласно полученным в работе данным на ближайшей метеостанции № 23946 (60°30' с. ш., 74°01' в. д.) за 1991—2020 гг. продолжительность зимы составила 175 дней с 29 октября по 22 апреля.

В рамках проекта по исследованию атмосферного переноса как источника загрязнения экосистем бо-

лее чем в 40 точках западного сектора российской Арктики Северо-Западным отделением Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН производится пробоотбор снежного покрова и дальнейший анализ содержания в нем загрязняющих веществ [17; 18]. Часть точек выбрана в качестве опорных для моделирования переноса методом траекторий, они представлены на рис. 3. Точки располагаются как в населенных пунктах, так и на существенном удалении от них, причем для каждой на схеме в качестве географического ориентира приведен ближайший населенный пункт.

Границы летнего сезона с активным вегетационным периодом были определены в рассматриваемых точках за 2014—2023 гг. и усреднены в соответствии с описанной методикой. Так как для зимнего и летнего периодов определялись границы начала и конца, они же являются границами для весеннего и осеннего сезонов (результаты расчетов представлены в табл. 2).

Для сравнения в табл. 3 приведены результаты расчетов показателей по среднесуточной температуре. Этот метод показывает значительно большую продолжительность весны и осени, что частично может быть связано с методологией расчета, так как колебания среднесуточной температуры через пороговые значения (0°C и 10°C) могут наблюдаться в течение значительного времени, тогда как в данном случае учитываются первый и последний переходы. Наиболее явно данная ситуация прослеживается на берегу Кольского полуострова (точка № 1, Териберна), где существенное влияние оказывает

Таблица 2. Границы климатических сезонов и их продолжительности в опорных точках по данным о снежном покрове за 1991—2020 гг. и по вегетационному индексу NDVI за 2014—2023 гг.

Table 2. Seasonal boundaries and season duration at reference points, derived from snow cover data for 1991—2020 and the NDVI vegetation index for 2014—2023

№	Населенный пункт вблизи	Дата конца сезона				Продолжительность сезона, дни			
		Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1	Териберка	8 апр	30 май	16 окт	26 ноя	133	52	139	41
2	Мурманск	10 апр	26 май	12 окт	17 ноя	144	46	139	36
3	Мончегорск	22 апр	27 май	10 окт	11 ноя	162	35	136	32
4	Апатиты	22 апр	22 май	23 окт	14 ноя	159	30	154	22
5	Кандалакша	25 апр	16 май	21 окт	10 ноя	166	21	158	20
6	Кемь	9 апр	30 апр	31 окт	25 ноя	135	21	184	25
7	Онега	12 апр	26 апр	1 ноя	16 ноя	147	14	189	15
8	Северодвинск	16 апр	4 май	24 окт	14 ноя	153	18	173	21
9	Архангельск	16 апр	5 май	30 окт	15 ноя	152	19	178	16
10	Пинега	13 апр	6 май	28 окт	14 ноя	150	23	175	17
11	Мезень	15 апр	12 май	21 окт	12 ноя	154	27	162	22
12	Инди́га	24 апр	20 май	16 окт	14 ноя	161	26	149	29
13	Нарьян-Мар	8 май	5 июн	11 окт	27 окт	193	28	128	16
14	Нарьян-Мар	6 май	26 май	14 окт	29 окт	189	20	141	15

Таблица 3. Границы климатических сезонов и их продолжительность в рассматриваемых точках по данным о среднесуточной температуре за 1991—2020 гг.

Table 3. Seasonal boundaries and season duration at the considered points, derived from average daily temperature data for 1991—2020

№	Населенный пункт вблизи	Дата конца сезона				Продолжительность сезона, дни			
		Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
1	Териберка	30 янв	28 май	20 сен	16 дек	45	118	115	87
2	Мурманск	4 фев	26 май	20 сен	13 дек	53	111	117	84
3	Мончегорск	6 фев	22 май	21 сен	11 дек	57	105	122	81
4	Апатиты	8 фев	21 май	21 сен	10 дек	60	102	123	80
5	Кандалакша	8 фев	20 май	22 сен	9 дек	61	101	125	78
6	Кемь	31 янв	16 май	29 сен	13 дек	49	105	136	75
7	Онега	27 янв	7 май	29 сен	13 дек	45	100	145	75
8	Северодвинск	5 фев	9 май	26 сен	10 дек	57	93	140	75
9	Архангельск	5 фев	11 май	27 сен	9 дек	58	95	139	73
10	Пинега	13 фев	17 май	25 сен	8 дек	67	93	131	74
11	Мезень	21 фев	17 май	22 сен	8 дек	75	85	128	77
12	Инди́га	23 мар	7 июн	17 сен	1 дек	112	76	102	75
13	Нарьян-Мар	22 мар	2 июн	13 сен	26 ноя	116	72	103	74
14	Нарьян-Мар	29 мар	3 июн	14 сен	21 ноя	128	66	103	68

теплое Нордкапское течение. Изменения летнего сезона по среднесуточной температуре для российской Арктики в летний период на основе расчета трендов проанализировано в [19] по аналогичным данной работе данным.

Другим фактом, объясняющим разницу расчетов этими методами, являются суточные колебания температуры: так, при среднесуточной температуре 0°C могут наблюдаться дневные оттепели и ночные заморозки, а нарушение устойчивого снежного покрова или, наоборот, его становление в этих условиях может занимать некоторое время. В научной литературе данная проблема решается выделением дополнительных сезонов — предзимья и предвесенья [4], но с точки зрения моделирования атмосферного переноса примесей их можно отнести к осени и зиме соответственно.

Показатель температуры воздуха имеет достаточно высокую амплитуду изменения на довольно коротком промежутке времени, поэтому для расчета климатических сезонов по нему требуется применить существенное осреднение — для расчета среднесуточной температуры и для выделения трендов, что может давать более существенно сглаженную картину по сравнению с расчетом по показателям снежного покрова.

Заключение

В работе на основе данных о снежном покрове с наземных метеостанций за 1958—2023 гг. и вегетационного индекса со спутниковых снимков за 2014—2023 гг. выделены границы четырех климатических сезонов года в 14 опорных точках западного сектора российской Арктики, выбранных для моделирования переноса атмосферных примесей методом траекторий. Исползованные методы в результате дают продолжительные зимние и летние сезоны и короткие переходные периоды — весну и осень. В сравнении с методом выделения климатических сезонов по среднесуточной температуре границы зимы имеют достаточно близкие значения, но увеличивается летний период за счет весны и осени. С точки зрения моделирования такой подход дает лучшие результаты, так как отражает климатические изменения на протяжении года, играющие роль в переносе атмосферных примесей, в первую очередь это тип осадков, а также другие характеристики.

На основе обработанных данных были построены карты-схемы с интерполяционными поверхностями, отражающие изменения границ зимы и ее продолжительности в сравнении периодов 1991—2020 гг. и 1961—1990 гг. для российской Арктики. Полученные результаты позволяют сделать вывод об уменьшении продолжительности зимнего периода на этой территории.

Несмотря на практически равные средние значения изменения даты конца и начала зимы по рассматриваемой территории, длительность зимы

в российской Арктике изменяется неравномерно. Так, конец зимы наступает раньше на прибрежных территориях арктических морей, в свою очередь, начало зимы наступает позже для европейской части российской Арктики, чем для ее восточной части, за исключением Чукотского автономного округа.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-77-10074 «Атмосферный перенос как источник загрязнения экосистем западного сектора российской Арктики», руководитель Е. И. Котова.

Литература/References

1. Виноградова А. А., Веремейчик А. О. Поле потенциальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы в районе Ненецкого заповедника // Оптика атмосферы и океана. — 2012. — № 9. — С. 760—767. — EDN: PCIOJV.
Vinogradova A. A., Veremeichik A. O. Prospective sources of atmospheric aerosol pollution near Nenetsky nature reserve. Atmospheric and Oceanic Optics, 2012, no. 9, pp. 760—767. Available at: <https://www.elibrary.ru/pciojv>. (In Russian).
2. Виноградова А. А., Иванова Ю. А. Атмосферный перенос черного углерода в Российскую Арктику от различных источников (зима и лето 2000—2016 гг.) // Оптика атмосферы и океана. — 2023. — № 6. — С. 425—432. — DOI: 10.15372/AOO20230601.
Vinogradova A. A., Ivanova Yu. A. Atmospheric transport of black carbon to the Russian Arctic from different sources: winter and summer 2000—2016. Atmospheric and Oceanic Optics, 2023, no. 6, pp. 425—432. Available at: <https://doi.org/10.15372/AOO20230601>. (In Russian).
3. Виноградова А. А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофиз. процессы и биосфера. — 2014. — Т. 13, № 4. — С. 5—20. — EDN: TCTEXR.
Vinogradova A. A. Distant evaluation of atmospheric pollution influence on the remote territories. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 5—20. Available at: <https://www.elibrary.ru/tctexr>. (In Russian).
4. Рутковская Н. В. Климатическая характеристика сезонов года Томской области. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1979. — 116 с.
Rutkovskaya N. V. Climatic characteristics of the year seasons in Tomsk region. Tomsk, 1979, 116 p. (In Russian).
5. Jaagus J., Ahas R. Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Climate Research, 2000, vol. 15, pp. 207—219. Available at: <http://dx.doi.org/10.3354/cr015207>.*
6. Ma B., Zhang B., Jia L. Spatio-temporal variation in China's climatic seasons from 1951 to

2017. *J. of Geographical Sciences*, 2020, vol. 30 (9), pp. 1387—1400. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1788-6>.
7. Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии. Материалы метеорологических исследований. — М., 1968. — 240 с.
Dzerdzeyevskiy B. L. Circulation mechanisms in the atmosphere of the Northern Hemisphere in the 20th century. Proceedings of Meteorological Researches. Moscow, 1968, 240 p. (In Russian).
8. Семенов С. М., Добролюбов Н. Ю. Классификация точек земной поверхности, основанная на свойствах годового хода переменных, характеризующих состояние приповерхностного слоя // *Фундамент. и прикладная климатология*. — 2024. — Т. 10, № 1. — С. 93—108. — DOI: 10.21513/2410-8758-2024-1-93-108.
Semenov S. M., Dobrolyubov N. Yu. Classification of the Earth's surface points based on the properties of the yearly course of variables characterizing a state of the near-surface layer. Fundamental and Applied Climatology, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 93—108. Available at: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-1-93-108>. (In Russian).
9. Алёхин С. Г., Иванов Р. Д., Шемелов В. А. Количественные характеристики естественных климатических сезонов отдельных районов Арктического региона // *Тр. Военноком. академии им. А. Ф. Можайского*. — 2021. — № 677. — С. 70—74. — EDN: TTOONQ.
Alekhin S. G., Ivanov R. D., Shemelov V. A. Quantitative characteristics of natural climatic seasons of individual areas of the Arctic region. Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo, 2021, no. 677, pp. 70—74. Available at: <https://www.elibrary.ru/ttoonq>. (In Russian).
10. Копанев И. Д. Климатические аспекты изучения снежного покрова. — Л.: Гидро-метеоиздат, 1982. — 231 с.
Kopanev I. D. Climatic aspects of snow cover study. L., Hydrometeoizdat, 1982, 231 p. (In Russian).
11. Разуваев В. Н., Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н. и др. Научно-прикладной справочник «Климат России». БД 2020621470: база данных / ВНИИГМИ-МЦД. Данные в формате dat. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru>. — EDN: MXYBEY.
Razuvaev V. N., Bulygina O. N., Korshunova N. N. et al. Scientific and applied reference book "Climate of Russia". Database No. 2020621470. VNIIGMI-MCD. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru>. (In Russian).
12. Черепанов А. С. Вегетационные индексы // *Геоматика*. — 2011. — № 2. — С. 98—102. — EDN: STYTLN.
Cherepanov A. S. Vegetation indices. Geomatics, 2011, no. 2, pp. 98—102. Available at: <https://www.elibrary.ru/stytlN>. (In Russian).
13. Vermote E. NOAA CDR Program: NOAA Climate Data Record (CDR) of AVHRR Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Version 5. NOAA National Centers for Environmental Information, 2019. Available at: <https://doi.org/10.7289/V5ZG6QH9>.
14. Булыгина О. Н., Веселов В. М., Коршунова Н. Н. Атмосферные явления на метеорологических станциях России (сроки). БД 2015620081: база данных / ВНИИГМИ-МЦД. Данные в формате dat. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru>.
Bulygina O. N., Veselov V. M., Korshunova N. N. Atmospheric phenomena at meteorological stations of Russia (timeframes). Database No. 2015620081. VNIIGMI-MCD. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru>. (In Russian).
15. Salomonson V. V., Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 89, iss. 3, pp. 351—360. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016>.
16. Звягина Е. А., Переясловец Т. С. Динамика метеорологических показателей и продолжительности вегетационного периода в Юганском заповеднике // *Динамика окружающей среды и глоб. изменения климата в 1961—2016 гг.* — 2018. — Т. 9, № 2. — С. 28—39. — DOI: 10.17816/edgcc10367.
Zvyagina E. A., Pereyaslovets T. S. Long-term phenoclimatic averages of the Yuganskiy Nature Reserve territory and changes for 1961—2016. Environmental Dynamics and Global Climate Change, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 28—39. Available at: <https://doi.org/10.17816/edgcc10367>. (In Russian).
17. Котова Е. И., Стародымова Д. П., Лохов А. С., Нецветаева О. П. Состав взвеси в снежном покрове западного сектора Российской Арктики // *Лед и Снег*. — 2024. — № 4. — С. 591—601.
Kotova E. I., Starodymova D. P., Lokhov A. S., Netsvetaeva O. P. Composition of suspended sediment in the snow cover of the western sector of the Russian Arctic. Water Resources, 2024, vol. 4, pp. 591—601. (In Russian).
18. Стародымова Д. П., Котова Е. И., Шевченко В. П., Титова К. В., Лукьянова О. Н. Зимняя атмосферная депозиция следов элементов в Архангельской области (северо-запад России): инсайты в экологические эффекты. *Atmospheric Pollution Research*, 2024, vol. 15, iss. 12, 102310. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102310>.
19. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики как индикатор природных границ северных ландшафтов // *Арктика: экология и экономика*. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 386—396. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396.
Titkova T. B., Zolotokrylin A. N. Regional unevenness of the summer warming in the continental Arctic as an indicator of natural boundaries of northern landscapes. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 386—396. Available at: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-386-396>. (In Russian).

Информация об авторах

Лохов Алексей Сергеевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией исследований и моделирования геоэкологических процессов Северо-Западного отделения, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: lohov.as@ocean.ru.

Котова Екатерина Ильинична, кандидат географических наук, директор Северо-Западного отделения, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: kotova.ei@ocean.ru.

Чибисова Валерия Геннадьевна, кандидат географических наук, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: leratatarintseva@gmail.com.

DETERMINATION OF CLIMATE SEASON BOUNDARIES FOR THE PARAMETERIZATION OF THE ATMOSPHERIC IMPURITY TRANSPORT MODEL IN THE RUSSIAN ARCTIC TERRITORY

Lokhov, A. S., Kotova, E. I., Chibisova, V. G.

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on December 18, 2024

For citing

Lokhov A. S., Kotova E. I., Chibisova V. G. Determination of climatic season boundaries for the parameterization of the atmospheric impurity transport model in the Russian Arctic territory. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 27—37. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-27-36. (In Russian).

Abstract

The paper identifies the boundaries of climate seasons for the Russian Arctic. The winter season is defined as a period with stable snow cover, and the summer season is an active vegetation period. Snow cover data are provided by meteorological stations, the vegetation period is determined by the NDVI index based on satellite images. The study purpose is to determine the season boundaries at the selected reference points for parameterization of the impurity transport model using the trajectory analysis method. For comparison, the climate season boundaries have been calculated at the considered reference points based on the average daily temperature using a simplified methodology without trend analysis. Another part of the study is devoted to a related problem — comparing the temporal boundaries of the winter season for 1991—2020 and 1961—1990. Based on these indicators, maps with interpolated surfaces have been built, and conclusions drawn about the unevenness of their changes in the considered territory.

Keywords: *atmospheric impurity transport, Russian Arctic, climate season, climate change in the Arctic, stable snow cover, NDVI vegetation index, winter duration.*

Funding

The research was funded by the Russian Science Foundation, grant no. 23-27-00225 “Atmospheric transport as a source of pollution of ecosystems in the western sector of the Russian Arctic”.

Information about the authors

Lokhov, Aleksey Sergeevich, PhD of Geography, Senior Researcher, Head of the Research and Modeling of Environmental Processes Laboratory of the North-West Branch, Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: lohov.as@ocean.ru.

Kotova, Ekaterina Ilyinichna, PhD of Geography, Director of the North-West Branch, Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of the Sciences (36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: kotova.ei@ocean.ru.

Chibisova, Valeria Gennadyevna, PhD of Geography, Junior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, Russia, 117997), leratatarintseva@gmail.com.

© Lokhov A. S., Kotova E. I., Chibisova V. G., 2025