

УДК 551.557.5:551.507.362

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2021 г. А. Ф. Нерушев^а, *, К. Н. Вишератин^а, Р. В. Ивангородский^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение “Научно-производственное объединение Тайфун”,
ул. Победы, 4, Обнинск, 249038 Россия

*E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 28.01.2021 г.

После доработки 18.03.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

Представлена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария за период 2007–2019 гг. В основу модели положены результаты обработки данных измерений радиометра SEVIRI. В качестве предикторов для построения модели множественной линейной регрессии использовались площадь арктического морского льда, значения температуры тропосферы на разных уровнях и их разности между низкими и высокими широтами, различные индексы крупномасштабных процессов, характеризующие климатическую изменчивость. Детальный спектральный анализ стандартизованных рядов характеристик струйных течений и предикторов выявил присутствие периодических колебаний в широком спектральном диапазоне — от короткопериодных до длиннопериодных (30–50 мес.). Построена модель, описывающая весь спектр временных вариаций характеристик струйных течений, а также модель вариаций только длиннопериодной части. Показано, что наибольший вклад в вариации характеристик струйных течений вносят площадь морского льда и группа предикторов, связанных с вариациями температуры тропосферы. Максимальный вклад индексов крупномасштабных атмосферных процессов в качество модели не превышает 10%. В целом модель множественной линейной регрессии позволяет описать до 50–70 процентов изменчивости средней площади, максимальной скорости и широтного положения центра струйного течения.

Ключевые слова: высотные струйные течения, регрессионный и спектральный анализ, спутниковые измерения, площадь арктического морского льда, температура тропосферы, индексы крупномасштабных процессов

DOI: 10.31857/S0002351521040088

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к высотным струйным течениям в атмосфере, проявляемый в последние годы в научной литературе, обусловлен прежде всего той ролью, которую они играют в динамике верхней тропосферы и нижней стратосферы и обсуждаемой связи с аномальными погодными явлениями, частота и интенсивность проявления которых существенно возрастают в условиях глобального потепления климата (см., например, [1, 2]). Работы, выполненные в этом направлении можно условно разделить на теоретическое моделирование реакции струи на внешние воздействия той или иной природы, обусловленные климатическими изменениями, и использование баз данных реанализа или каких-либо других для исследования динамики струйных течений. Краткий

обзор этих работ приведен в [3, 4]. Главные выводы, следующие из них, можно сформулировать следующим образом: а) реакция струйного течения на антропогенное изменение климата является многогранной, с участием сложных взаимодействий между различными системами; б) скорость и широтное положение струи проявляют различную чувствительность к термическому форсингу, широтное положение струи наиболее чувствительно в умеренных и полярных широтах, а скорости струи — в субтропиках и тропиках; в) выявлен сдвиг среднего положения струи в Северном и Южном полушариях к полюсу и ослабление ее скорости; г) выявлен ряд потенциальных предикторов изменчивости высотного струйного течения в летний период.

Следует отметить работу [5], посвященную исследованию изменчивости струйного течения Се-

верной Атлантики на основе использования данных реанализа, выявлению потенциальных предикторов и построению регрессионных моделей. Авторы получили оценку влияния внешних факторов на изменчивость струйного течения и установили, что простая модель линейной регрессии способна объяснить до 35% летней изменчивости скорости и широты струйного течения с 1955 г. В то же время подчеркнуто, что естественная изменчивость струйного течения может быть высокой и способна оказывать маскирующий эффект на влияние внешних факторов.

В наших работах [3, 6] на основе обработки результатов измерений европейских геостационарных метеорологических спутников, применения спектрального и вейвлетного анализов выявлены общие закономерности и существенные различия межгодовой изменчивости основных характеристик струйных течений в Северном и Южном полушариях; проведено детальное исследование периодических колебаний характеристик струйных течений, выявлены значимые колебания с периодами в несколько десятков суток и месяцев, а также исследована связь характеристик струйных течений с температурой тропосферы, площадью морского льда и крупномасштабными атмосферными явлениями. Показан сложный, изменяющийся со временем характер их связей с Северо-Атлантическим колебанием (NAO) и квазидвухлетней цикличностью зонально усредненного над экватором ветра (QBO).

В плане воздействия внешних факторов на струйные течения особая роль принадлежит площади арктического морского льда [2, 7], существенные уменьшения которой наблюдаются в последние годы. Сложные цепочки связей могут приводить к установлению на обширных территориях довольно длительных погодных аномалий, сохраняющихся неделями [8]. В работе [9] рассмотрена связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха в 2017–2019 гг. на метеорологических станциях Европы и Европейской территории России (ЕТР) с характеристиками высотных струйных течений, определяемыми по данным спутниковых измерений. Показано, что наибольшая связь аномалий среднемесячной приземной температуры отмечается с аномалиями широты центра струйного течения. При смещении центра струйного течения на север относительно среднего многолетнего положения на значительной территории Европы и в северных районах ЕТР среднемесячная температура с большой степенью вероятности опускается ниже климатической нормы и наоборот.

Настоящая статья, являющаяся продолжением упомянутых выше работ, посвящена разработ-

ке модели множественной линейной регрессии временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария на основе измерений европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения за период 2007–2019 гг.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

Для расчетов и последующего анализа используются данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8–Meteosat 10 с временным интервалом 15 мин за период 2007–2019 гг. Эти данные по каналам связи поступают из НИЦ “Планета” в НПО “Тайфун” и заносятся в базу данных. Нижняя граница временного периода обусловлена имеющимся в НИЦ “Планета” архивом пригодных для обработки данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI. Радиометр обозревает область земного шара ± 70 град по широте и долготе от подспутниковой точки (0 град) и имеет максимум весовой функции для канала 6.2 мкм, информация с которого используется в расчетах, на уровне приблизительно 350 гПа для атмосферных условий, соответствующих умеренным широтам (<http://www.eumetsat.int/>). Таким образом, в зону обзора радиометра могут попадать струйные течения как умеренных широт, так и субтропические.

Положение струйных течений и их характеристики определяются на основе вычисления поля ветра в верхней тропосфере по перемещениям атмосферных трассеров – неоднородностей концентрации водяного пара. Поле горизонтальной скорости ветра (V) в верхней тропосфере рассчитывается по данным канала водяного пара радиометра SEVIRI с центром на 6.2 мкм в узлах сетки с шагом 10 пикселей по трем последовательным снимкам, разделенным временным интервалом 15 мин. Как указано выше, для условий умеренных широт этот канал имеет максимум весовой функции на уровне около 350 гПа (приблизительно 8 км), а полуширина весовой функции составляет приблизительно 300 гПа (<http://www.eumetsat.int/>). Поэтому можно считать, что эффективный излучающий слой атмосферы для этого канала находится между уровнями 200–500 гПа. Абсолютная погрешность вычисления модуля горизонтальной скорости ветра разработанным методом не превышает 8 м/с, а азимута скорости – 15–20 град [10]. Результаты расчетов приписываются уровню максимума весовой функции радио-

метра. Далее с помощью процедур, детально описанных в работах [6, 11, 12], вычисляются основные характеристики струйных течений, к которым относятся: средняя площадь областей струйного течения (S), максимальная скорость ветра (V_m) на оси, широта (φ) и долгота (λ) центра области струйного течения, максимальный градиент (сдвиг) горизонтальной скорости ветра на циклонической (G_c) и антициклонической (G_a) сторонах, а также эффективное время “жизни” струйного течения (τ).

Под эффективным временем “жизни” (τ) понимается промежуток времени, в течение которого сохраняются в определенных пределах некоторые интегральные характеристики струйного течения [11], а именно, максимальные значения относительного изменения S не превышают 40%, а абсолютные изменения φ и λ не превышают 10 град. При одновременном превышении указанных значений считается, что струйное течение прекращает свое существование и определяется эффективное время его “жизни”. Определенные таким методом области струйного течения представляют собой, по существу, сечения струйного течения горизонтальной плоскостью на уровне приблизительно 350 гПа.

В качестве предикторов для построения статистической модели временной изменчивости характеристик высотных струйных течений использовались:

– среднемесячные квазизональные (усредненные по долготной области 70° з.д. – 70° в.д.) значения температуры тропосферы (T_p) на разных уровнях по данным реанализа NCEP/NCAR [13] и их разности на уровнях 200 и 500 гПа (ΔT_{200} и ΔT_{500}) между низкими (0°) и высокими (80°) широтами;

– среднемесячная площадь арктического морского льда (S_{ice}) по данным NOAA (<ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/>);

– различные индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции, рассчитанные в Центре прогнозов климата Национального управления по исследованию океана и атмосферы США (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>): NAO (Северо-Атлантическое колебание – вариации поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа для внетропической зоны Северного полушария), AO (арктическое колебание – аномалии поверхности 1000 гПа для Северного полушария севернее 20°), EAWR (East Atlantic/Western Russia, Восточно-Атлантический–Западно-Российский циркуляционный индекс–вариации поля геопотенциала 500 гПа севернее 20° для региона Атлантика–Западная Сибирь), QBO30 и QBO50 (квази-

двухлетние вариации экваториального ветра на уровнях 30 и 50 гПа), SOI (индекс Южного колебания – разность аномалий давления над Таити и над Дарвином).

Временные ряды перечисленных выше возможных предикторов (\mathbf{P}) имеют различную продолжительность. Кроме того, существенным образом может отличаться их представление в базах данных – это могут быть оригинальные значения в соответствующих единицах измерений, отклонения (аномалии) от среднего за весь период измерений (или от климатического среднего), а также стандартизованные величины (аномалии, нормированные на стандартное отклонение ряда).

Амплитуда колебаний значений, характеризующих изменчивость предикторов, в рядах, представляющих отклонения от среднего, т.е. аномалии, обычно невелика, в то время как амплитуда рядов, содержащих оригинальные исходные данные, может отличаться в разы и на порядки. Существенно отличаются и значения амплитуд колебаний характеристик струйных течений (\mathbf{X}).

Для того, чтобы при проведении регрессионного анализа иметь примерно однородные ряды предикторов (по величине дисперсии ряда), нами была проведена предварительная унификация временных рядов предикторов и характеристик струйных течений \mathbf{P} и \mathbf{X} . С этой целью была проведена стандартизация рядов: $\mathbf{X}_0 = (\mathbf{X} - \mathbf{M})/\text{STD}$, т.е. из рядов вычиталось среднее \mathbf{M} за период 2007–2019 г., и ряды нормировались на стандартное отклонение STD. Таким же образом формировались стандартизованные ряды \mathbf{P}_0 . Дополнительно к процедуре стандартизации из анализируемых среднемесячных величин был исключен линейный тренд $\mathbf{Y} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 \mathbf{N}$, где начальное время $\mathbf{N} = 1$ соответствует январю 2007 г., \mathbf{b}_0 , \mathbf{b}_1 – параметры тренда. Параметры \mathbf{M} , STD, \mathbf{b}_0 , \mathbf{b}_1 исходных рядов характеристик струйных течений \mathbf{X} приведены в табл. 1, а рядов предикторов \mathbf{P} – в табл. 2. Размерность параметра \mathbf{b}_1 в табл. 1 и 2 выражается в соответствующей размерности характеристике струйного течения или предиктора, деленной на год. Рассматриваемые нами характеристики струйных течений имеют продолжительность многим более 10 лет, и по мере накопления новых данных, тренды, также как и другие параметры этих рядов, будут меняться. Представленные параметры приведены с целью дать представление о вариациях и трендах исходных рядов за рассматриваемый период, а также для обратной реконструкции построенных на стандартизованных рядах модельных статистических расчетов.

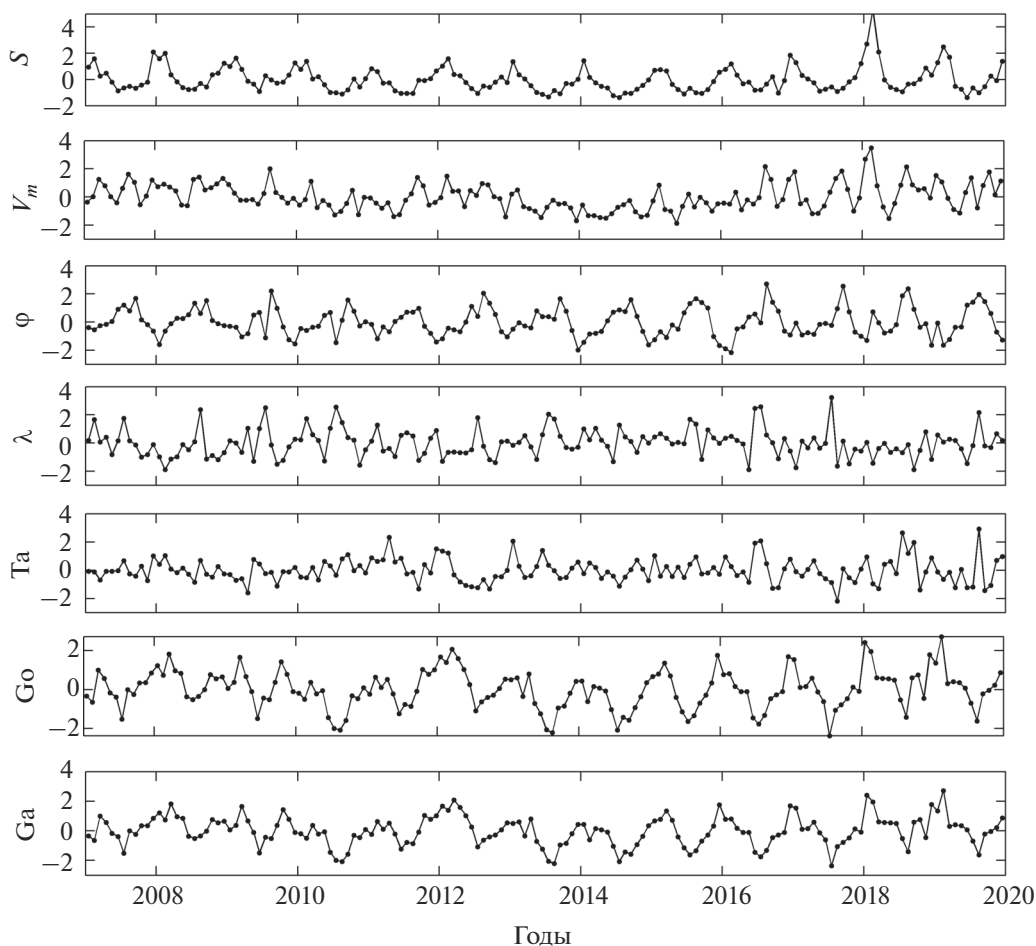


Рис. 1. Временные вариации исходных стандартизованных рядов характеристик струйных течений X_o .

Таблица 1. Параметры рядов струйных течений X для периода 2007–2019 гг. Жирным шрифтом выделены параметры тренда, значимые на уровне доверительной вероятности 95%

Ряд	Параметры рядов			
	М	STD	b0	b1
S	1.3	0.57	1.0	0.0030
V_m	68	4.9	65	0.028
φ	36	4.8	36	0.0073
λ	1.8	6.7	2.6	-0.011
τ	29	4.2	25	0.049
G_c	0.23	0.032	0.24	-0.00013
G_a	0.14	0.017	0.15	-0.00020

Таким образом, были составлены не имеющие тренда временные ряды характеристик струйных течений и предикторов со средним, равным нулю и примерно с одинаковой дисперсией. Стандартизованные ряды характеристик струйных течений X_o и предикторов P_o представлены на рис. 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации характеристик струйных течений и предикторов содержат колебания, спектральная структура которых может значительно отличаться. Для оценки спектральной структуры параметров струйных течений и предикторов был проведен спектральный анализ стандартизованных рядов с помощью модифицированного Фурье преобразования Ломба–Скаржла [14]. Из спектров, представленных на рис. 3, следует, что в рядах струйных течений и предикторов наряду с сезонными вариациями проявляются значительные длиннопериодные колебания с периодами более 20 мес. Один из

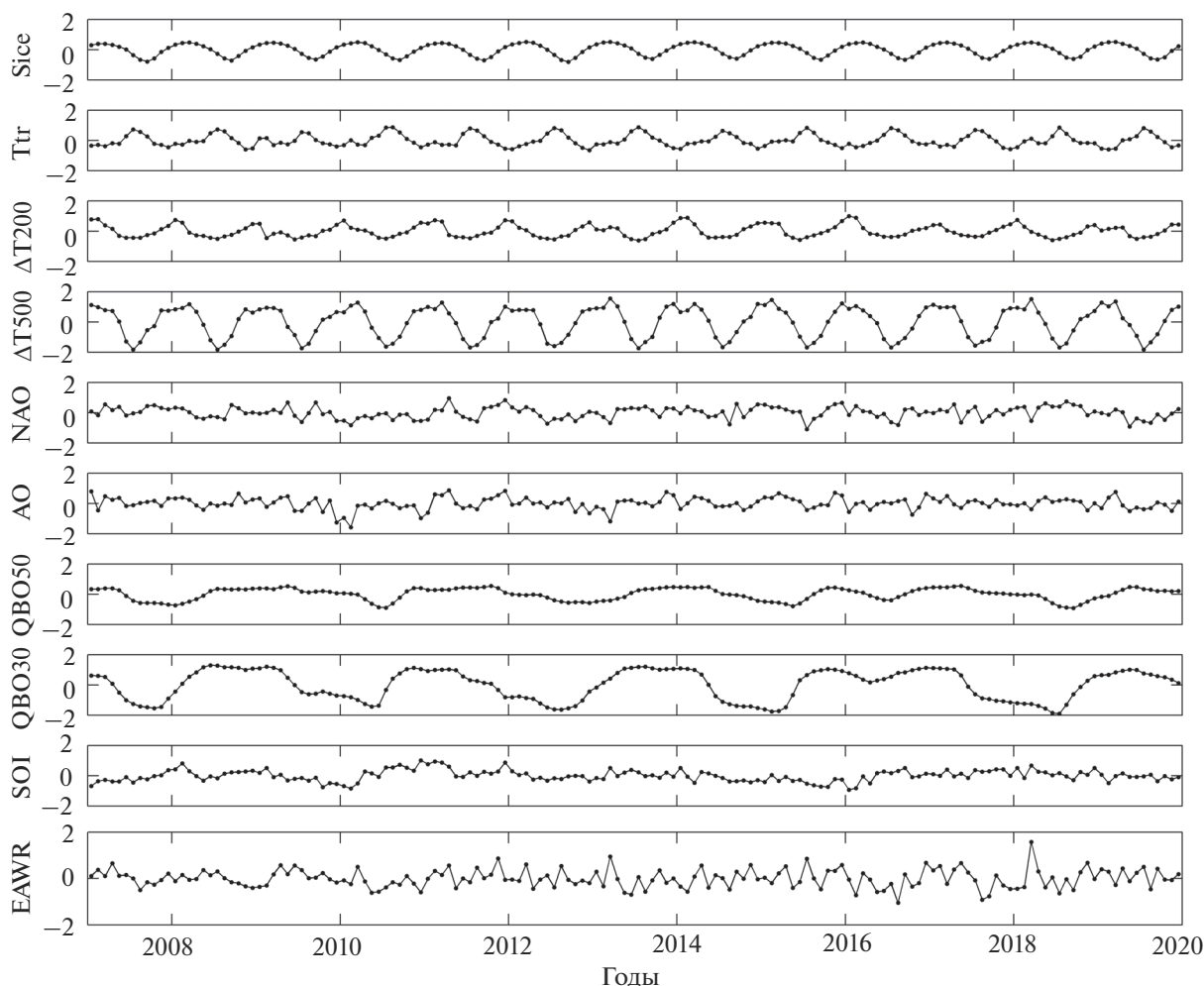


Рис. 2. Временные вариации стандартизованных рядов предикторов P_0 .

распространенных подходов к построению статистической модели заключается в представлении временного ряда в виде суммы тренда и выделенных на основе спектрального анализа основных гармонических составляющих. Такие модели могут успешно аппроксимировать временные вариации изучаемого процесса при условии сохранения с течением времени величины тренда и стабильности амплитуды и фазы включенных в модель гармоник [15]. Однако проведенный ранее в работах [3, 6] анализ вейвлетограмм параметров струйных течений и ряда предикторов показал, что структура длиннопериодных колебаний с периодом более одного года с течением времени может изменяться, что затрудняет выбор гармонических составляющих.

Построение модели для исходных рядов P_0 и X_0 , содержащих полный набор присутствующих в анализируемых рядах колебаний и в том числе наиболее мощную годовую гармонику, с большой

Таблица 2. Параметры рядов предикторов P для периода 2007–2019 гг. T_{tr} – температура тропосферы на уровне 200 гПа. Жирным шрифтом выделены параметры тренда, значимые на уровне доверительной вероятности 95%

Ряд	Параметры рядов			
	M	STD	b0	b1
S_{ice}	11	3.5	11	-0.0076
T_{tr}	-56	2.4	-56	-0.0010
$\Delta T200$	0.25	6.3	0.34	-0.0012
$\Delta T500$	25	6.0	26	-0.0058
NAO	-0.069	1.2	-0.48	0.0052
AO	0.014	1.1	-0.096	0.0014
QBO50	0.34	8.3	0.32	0.00021
QBO30	-3.3	15	-6.6	0.041
SOI	0.45	1.6	1.4	-0.012
EAWR	-0.34	1.1	-0.31	-0.00050

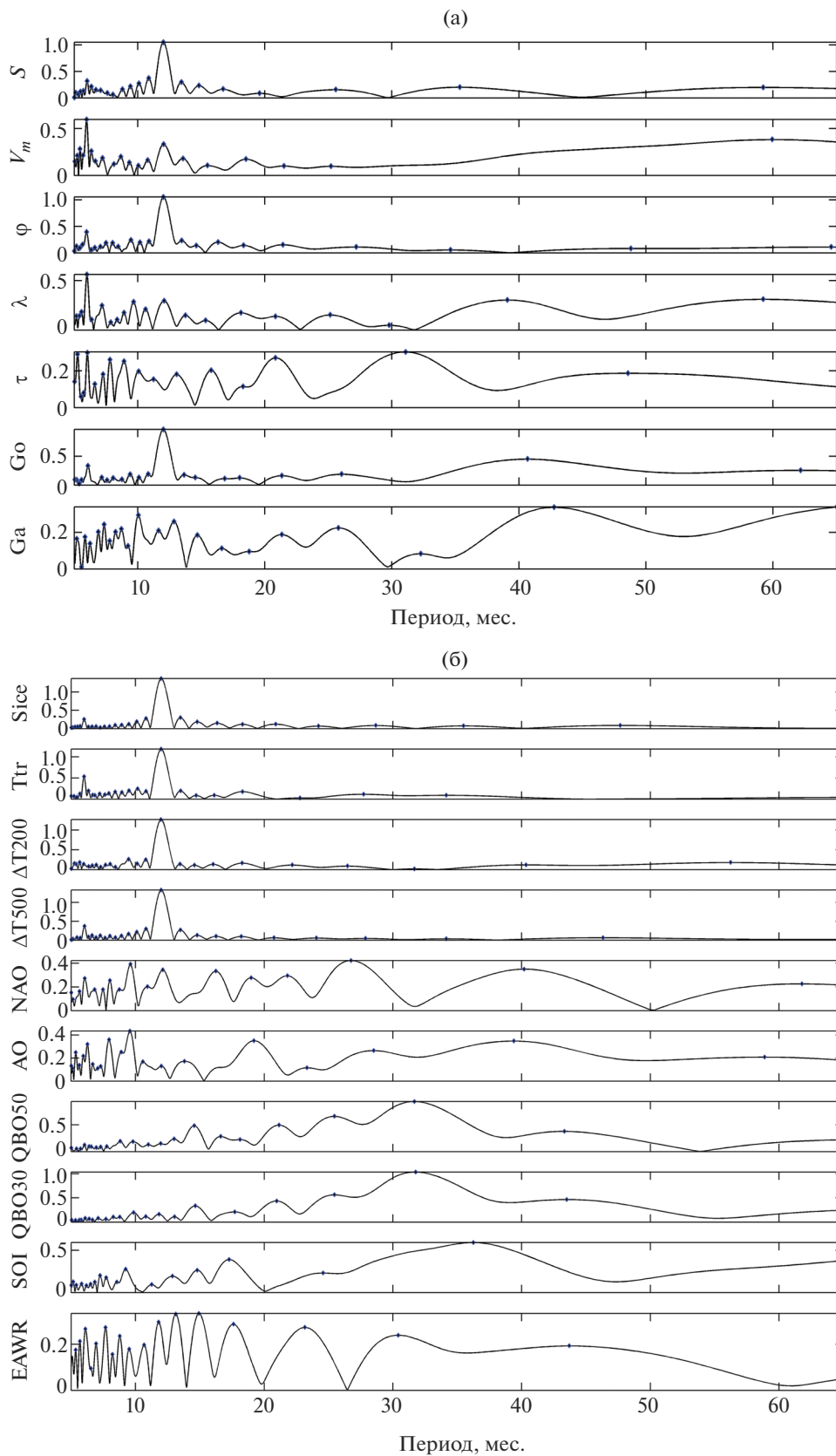


Рис. 3. Амплитудные спектры характеристик струйных течений (а) и предикторов (б) для периодов от 5 до 65 мес. По оси ординат – амплитуда колебаний.

Таблица 3. Коэффициенты регрессии и детерминации для исходных и композитных (в скобках) рядов S , φ , V_m . Жирным шрифтом выделены коэффициенты регрессии предикторов, вошедших в модели с уровнем доверительной вероятности 95% и выше)

Ряд	Коэффициенты регрессии a_n		
	$S (S_L)$	$\varphi (\varphi_L)$	$V_m (V_{mL})$
S_{ice}	0.095 (1.13)	-0.43 (-1.88)	-0.36 (0.07)
T_{ir}	0.176 (-0.79)	0.20 (-0.43)	-0.34 (-1.52)
ΔT_{200}	0.36 (-0.86)	-0.29 (-0.48)	0.15 (-1.70)
ΔT_{500}	0.46 (-2.92)	0.01 (1.96)	0.39 (-4.1)
NAO	0.003 (0.39)	-0.08 (-0.23)	0.004 (-0.16)
AO	0.01 (-0.26)	-0.08 (0.31)	0.007 (0.35)
QBO50	-0.07 (-0.1)	0.01 (-0.07)	0.002 (-0.17)
QBO30	-0.115 (-0.08)	0.01 (-0.03)	-0.11 (0.03)
SOI	0.04 (0.03)	-0.01 (-0.02)	-0.04 (0.15)
EAWR	-0.003 (-0.33)	-0.02 (-0.23)	0.01 (-0.39)
	Коэффициент детерминации		
R2	0.50 (0.65)	0.62 (0.67)	0.10 (0.71)

вероятностью приведет к выделению предикторов, имеющих заметные годовые колебания. Часто применяемый метод исключения годового колебания и его гармоник после предварительных расчетов нами был отклонен, так как оставшиеся после десеонализации колебания с периодами менее 12 мес. и в области 13–20 мес., имеющие в ряде случаев заметную амплитуду, сложно отождествить с какими-либо геофизическими процессами. Поэтому в настоящей работе был использован метод [16], суть которого заключается в раздельном анализе методами обратной пошаговой регрессии рядов P_0 и X_0 и рядов P_L и X_L , в которых содержатся только длиннопериодные колебания с периодом 2 года и более.

Для формирования временных рядов P_L и X_L , содержащих только длиннопериодные колебания (далее композитные ряды), был использован метод спектральной фильтрации [16]. Предварительно для каждого ряда вычислялось Фурье-преобразование с шагом по частоте 0.0001 мес.^{-1} . Для периодов от 20 мес. и более рассчитывалось обратное Фурье-преобразование и составлялись композитные ряды P_L и X_L , содержащие сумму только длиннопериодных гармоник. Используемый метод спектральной фильтрации основан на классическом Фурье-преобразовании и позволяет в отличие от других известных методов минимизировать возникающие при фильтрации фазовые искажения. Для приведенных в работе рядов, содержащих значительную годовую гармонику, подавление таких гармоник составляет 30–40 дБ. Используемая частота среза $1/20 \text{ мес.}^{-1}$ позволяет подавить

присутствующее в ряде предикторов ближайшее к частоте среза колебание с периодом около 18 мес. на 20 дБ. Вместе с тем отметим, что этот метод имеет недостаточную точность на концах ряда, что связано с присущим Фурье-преобразованию ограничением, связанным с конечной длительностью рядов.

Для построения статистической модели, описывающей временные вариации характеристик струйных течений, использовался метод обратной пошаговой множественной регрессии. Для оценки мультиколлинеарности анализируемых рядов дополнительно проводились расчеты методами гребневой регрессии (ridge regression) и частичной регрессии наименьших квадратов (partial least-squares regression). Временной ряд предиктанта (характеристики струйного течения X_0 или X_L) моделировался суммой вкладов различных предикторов (регрессоров) и шумовой составляющей:

$$Y(t) = a_1 P_1(t) + a_2 P_2(t) + \dots + a_n P_n(t) + N(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – среднемесячные значения характеристики струйного течения, t – время (порядковый номер месяца), $P_n(t)$ – временной ряд предиктора n , a_n – коэффициенты регрессии, или коэффициенты влияния этих предикторов, $N(t)$ – остатки. На первом этапе исследований нами были проведены расчеты индивидуального вклада каждого из регрессоров в отдельности, а также оценка возможной коллинеарности. Как для исходных рядов P_0 и X_0 , так и для композитных P_L и X_L вариация коэффициентов регуляризации (параметров гребня в методе гребневой регрессии) не влияет на значения коэффициентов регрессии a_n .

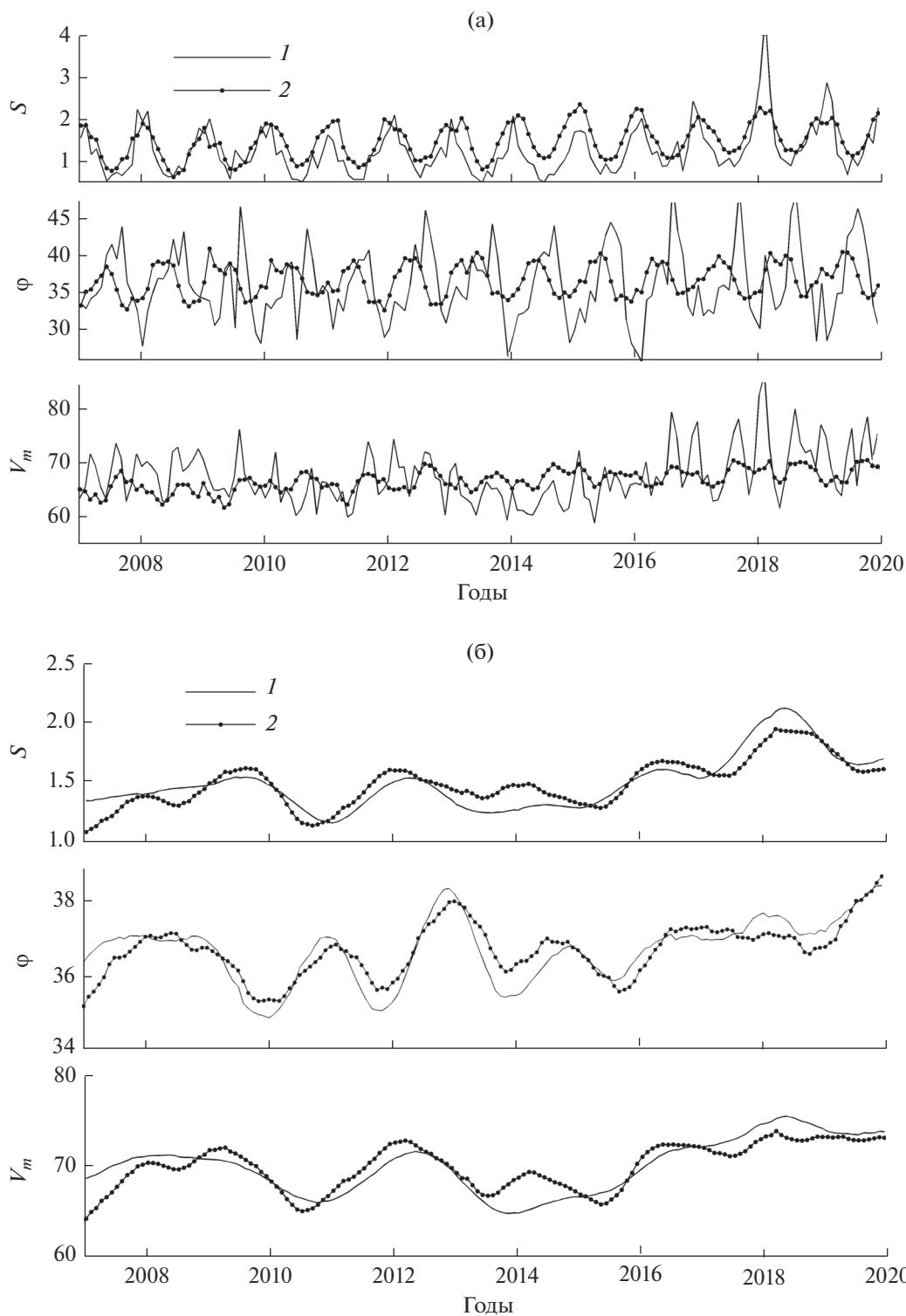


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных исходных (а) и композитных (б) рядов вариаций S (млн км²), φ (градусы) и V_m (м/с) (кривые 1) с расчетом (кривые 2) по формуле (1).

В этом случае коэффициенты регрессии, найденные методами гребневой регрессии и частичной регрессии наименьших квадратов, совпадают с коэффициентами регрессии, найденными мето-

дом пошаговой регрессии. В случае исходных рядов \mathbf{R}_0 отсутствие коллинеарности обусловлено тем, что несмотря на значительные амплитуды годовых колебаний, фазовые соотношения между

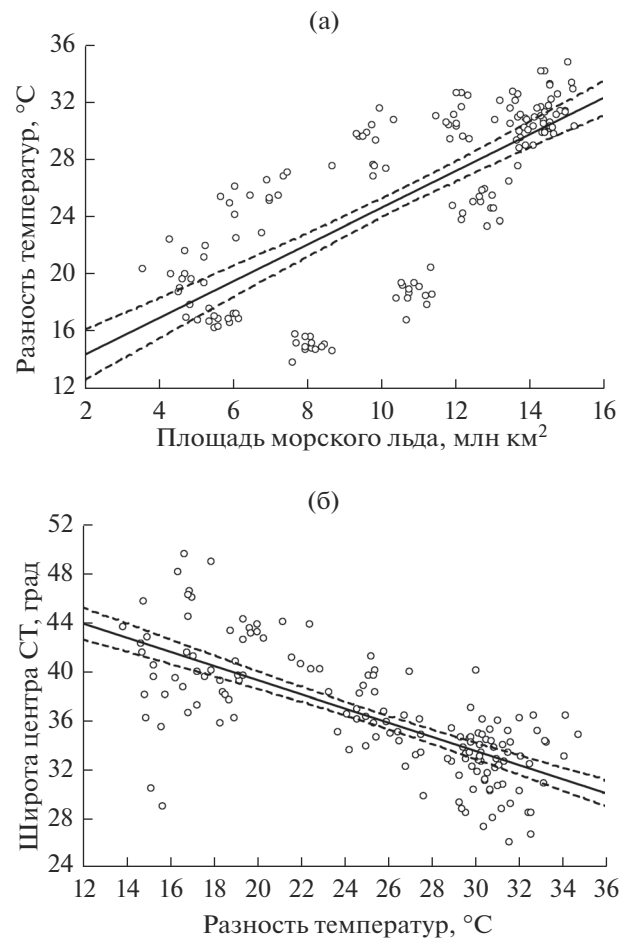


Рис. 5. Зависимость разности среднемесячных температур тропосферы на уровне 500 гПа между низкими (0°) и высокими (80°) широтами от площади арктического морского льда (а), широты центра струйного течения от разности температур на уровне 500 гПа (б). Кружки – расчетные значения, сплошные прямые – линии регрессии, штриховые – их 95% доверительные интервалы.

различными предикторами отличаются. Анализ регрессионных соотношений с учетом фазовых сдвигов предикторов предполагается на следующих этапах исследований.

Модель для каждой из характеристик струйных течений выбиралась по критерию максимума коэффициента детерминации R^2 . Методика построения модели в методе обратной пошаговой регрессии основана на обычной процедуре многократного перебора возможных предикторов и оценки величины и значимости коэффициентов регрессии. В результате в модель включались предикторы с наибольшим вкладом в объясненную дисперсию и исключались предикторы, вклад которых невелик, в нашем случае менее 2%.

Коэффициенты регрессии и коэффициенты детерминации R^2 для трех наиболее важных характеристик струйных течений S , φ , V_m приведены в табл. 3. Уровень доверительной вероятности

коэффициентов регрессии для вошедших в модель предикторов 95% и выше. На рис. 4 приведено сопоставление расчетов по модели и экспериментальных данных.

В целом модель множественной линейной регрессии позволяет описать до 50–70 процентов изменчивости указанных характеристик струйных течений. Отметим некоторые особенности представленных на рис. 4 данных. Согласие расчета с моделью для исходных S и φ и композитных рядов S_L и φ_L удовлетворительное, коэффициенты детерминации отличаются незначительно. Однако для максимальной скорости ветра различие между качеством моделей для V_m и V_{mL} существенно. Это обусловлено тем обстоятельством, что в вариациях V_m годовая гармоника проявляется слабо (рис. 3а), в то время как в вариациях предикторов S_{ice} , T_{tr} , ΔT_{200} и ΔT_{500} она ярко выражена (рис. 3б).

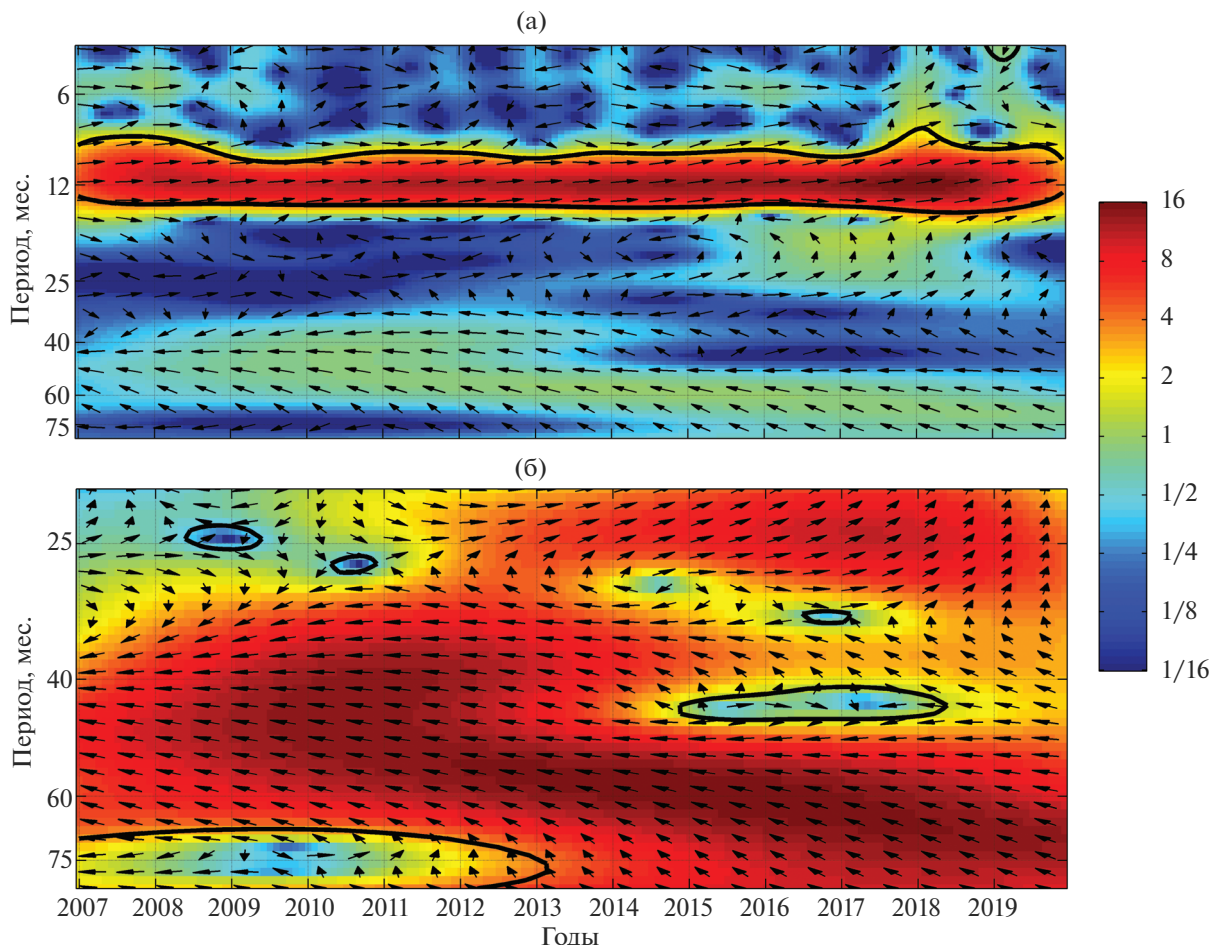


Рис. 6. Кросс-корреляционный вейвлетный анализ площади струйных течений S и разности температур экватор – полюс на уровне 200 гПа ΔT_{200} . (а) – стандартизованные (исходные) ряды, (б) – композитные ряды. Направление стрелок вправо указывает на совпадение фаз, влево – на противофазность колебаний. Цветовая шкала дана в условных единицах.

Рассмотрим приведенные в табл. 3 результаты расчетов более детально. Наибольший вклад в вариации характеристик струйных течений вносят площадь морского льда S_{ice} и температурные характеристики тропосферы. Суммарный вклад первых четырех предикторов в табл. 3 для S , φ , V_m составляет соответственно 45 (55), 62 (57) и 9 (63)%. В скобках указаны проценты для композитных рядов. Некоторые предикторы, такие как площадь морского льда и группа предикторов, связанных с вариациями температуры, вошли в модель как для исходных, так и для композитных рядов, что указывает на широкий спектральный интервал корреляционных связей. Индексы NAO, AO и EAWR вошли только в модели, описывающие длиннопериодные вариации. Это объясняется небольшой величиной или отсутствием годовой гармоники в этих индексах (см. рис. 3б). При

этом суммарный вклад NAO, AO и EAWR в длиннопериодные вариации S , φ , V_m составляет соответственно 10, 9 и 6%. Влияние индексов QBO и SOI на изменчивость характеристик струйных течений оказалось незначительным. Введение этих предикторов улучшает качество модели на 1–2%.

Как можно объяснить довольно значительное влияние S_{ice} на струйное течение, прежде всего на его широтное положение (φ)? Как показано в [3], вариации годового колебания S_{ice} и φ близки к противофазе, т.е. с уменьшением площади морского льда струйное течение сдвигается по направлению к полюсу, с увеличением – к экватору. При этом кросс-вейвлетный анализ выявляет, начиная с 2011 г., небольшое отставание по фазе годового колебания φ от колебания S_{ice} . Влияние S_{ice} на φ проявляется, по нашему мнению, опосредованно – через температуру тропосферы, преж-

де всего через разность температур между низкими и высокими широтами. Наглядным подтверждением этому служит рис. 5, на котором для временного интервала 2007–2019 гг. представлены зависимости разности температур тропосферы на уровне 500 гПа между низкими (0°) и высокими (80°) широтами (ΔT_{500_0-80}) от площади арктического морского льда (S_{ice}), а также положения центра струйного течения по широте (φ) от разности температур на уровне 500 гПа. Аналогичные зависимости характерны и для ΔT_{200_0-80} .

Интересной особенностью приведенных в табл. 3 коэффициентов регрессии является разный знак для некоторых исходных и композитных рядов предикторов. Для первого предиктора площадь морского льда (S_{ice}), знаки коэффициентов регрессии для рядов, содержащих годовую гармонику, и композитных рядов совпадают. В то же время для группы температурных предикторов знаки различаются, хотя по данным Фурье-анализа заметные амплитуды колебаний в длиннопериодной области наблюдаются для предиктанта и предикторов. Это связано с тем, что результаты Фурье-анализа дают информацию о спектральном составе колебаний, усредненную за весь анализируемый интервал времени. Вместе с тем, как было показано в [3] методами вейвлетного анализа, спектральный состав колебаний с течением времени для ряда характеристик струйных течений и климатических параметров может меняться.

Рассмотрим на примере площади струйного течения S и предиктора ΔT_{200} динамику изменчивости корреляционных связей, используя для этого предложенную в [17] методику кросс-вейвлетного анализа на основе вейвлета Морле (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что в отличие от колебаний в спектральной области, соответствующей сезонному ходу, вариации рядов S и ΔT_{200} для периодов 30–70 мес. происходят в основном в противофазе, что и определяет изменения знака коэффициентов регрессии. Аналогичные особенности обнаруживаются и при кросс-корреляционном вейвлетном анализе других пар предиктантов и предикторов. Основной фактор, приводящий к формированию годовых вариаций предикторов, связан с солнечной инсоляцией. В то же время следует предположить наличие факторов, приводящих к отмеченным выше особенностям вариаций в области периодов 30–70 мес., которые, по видимому, не были учтены в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование спутниковых данных для выявления высотных струйных течений и анализа их ха-

рактеристик позволяет установить ряд закономерностей пространственно-временной изменчивости струйных течений, связи с важнейшими климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными процессами. Высокое временное разрешение спутниковых снимков (15 мин) дает возможность провести исследование периодических колебаний характеристик струйных течений в широком спектральном диапазоне – от короткопериодных до длиннопериодных (30–50 мес.) колебаний. Детальные исследования, выполненные по перечисленным направлениям, позволили построить статистическую модель временной изменчивости характеристик струйных течений Северного полушария в зоне обзора европейских геостационарных метеорологических спутников (Атлантика, Западная и Восточная Европа, Европейская территория РФ). В качестве предикторов для построения модели множественной линейной регрессии использовались: площадь арктического морского льда, значения температуры тропосферы на разных уровнях и их разности между низкими и высокими широтами, различные индексы крупномасштабных процессов, характеризующие климатическую изменчивость. Анализ построенной модели временной изменчивости основных характеристик струйных течений – средней площади, максимальной скорости ветра и широты центра струйного течения – позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Наибольший вклад в вариации характеристик струйных течений вносят площадь морского льда и группа предикторов, связанных с вариациями температуры тропосферы, прежде всего разность температур между высокими и низкими широтами на уровне 500 гПа.

2. Качество модели (коэффициент детерминации), описывающей весь спектр временных вариаций характеристик струйных течений и только его длиннопериодную часть, несколько отличается. Особенно это касается модели для максимальной скорости струйного течения.

3. Индексы крупномасштабных процессов вошли только в модели, описывающие длиннопериодные вариации. При этом их максимальный вклад в качество модели не превышает 10%.

4. В целом модель множественной линейной регрессии позволяет описать до 50–70 процентов временной изменчивости средней площади, максимальной скорости и широтного положения центра струйного течения.

Авторы выражают благодарность коллегам из НИЦ “Планета”, обеспечивающим передачу спутниковых данных в НПО “Тайфун”. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00831а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2020. 97с.
2. *Masters J.* The jet stream is getting weird // *Sci. Am.* 2014. V. 311. № 6. P. 68–75.
3. *Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В.* Динамика высотных струйных течений по данным спутниковых измерений и их связь с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями // *Исслед. Земли из космоса.* 2018. № 6. С. 24–38.
4. *Золотов С.Ю., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Хартюкина Е.В.* Изменчивость субтропического струйного течения Южного полушария во второй половине XX и в начале XXI веков // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2018. Т. 54. № 5. С. 505–515
5. *Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R.* Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability// *Climate Dynamics.* 2017. V. 48. P. 3869–3887.
<https://doi.org/10.1007/s00382-016-3307-0>
6. *Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В.* Пространственно-временная изменчивость высотных струйных течений по данным спутниковых измерений // *Исслед. Земли из космоса.* 2017. № 6. С. 31–45.
7. *Francis J.A.; Vavrus S.J.* Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. № 6.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051000>
8. *Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J.* Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2013. V. 110(14). P. 5336–5341.
9. *Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Кулижникова Л.К., Ивангородский Р.В.* О связи температурных аномалий с характеристиками высотных струйных течений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18. № 1. С. 199–209.
10. *Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К.* Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // *Исслед. Земли из космоса.* 2011. № 1. С. 3–13.
11. *Ивангородский Р.В., Нерушев А.Ф.* Характеристики струйных течений верхней тропосферы по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2014. Т. 11. № 1. С. 45–53.
12. *Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В.* Характеристики высотных струйных течений Северного и Южного полушарий по данным спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14. № 7. С. 299–307.
13. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K.C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D.* The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.,* 1996. V. 77. P. 437–471.
14. *Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. // *The Astrophysical J.* 1982. V. 263. P. 835–853.
15. *Вишератин К.Н., Каменогородский Н.Е., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Синяков В.П., Сорокина Л.И.* Спектрально-временная структура вариаций общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42. № 2. С. 205–223.
16. *Вишератин К.Н.* Межгодовые вариации и тренды среднезональных рядов общего содержания озона, температуры и зонального ветра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 4. С. 67–85.
17. *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. P. 61–78.

Statistical Model of Time Variability of Characteristics of Northern Hemisphere High-Altitude Jet Streams Based on Satellite Measurements

A. F. Nerushev^{1, *}, K. N. Visheratin¹, and R. V. Ivangorodsky¹

¹*Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon”,
Pobedy str., 4, Obninsk, 249038 Russia*

**e-mail: nerushev@rpatyphoon.ru*

A statistical model of the high-altitude jet streams characteristics in the Northern Hemisphere for the period 2007–2019 is presented. The model is based on the results of processing the measurement data of the SEVIRI radiometer. The area of Arctic sea ice, tropospheric temperature values at different levels and their differences between low and high latitudes, and various indices of large-scale processes characterizing cli-

mate variability were used as predictors for constructing the model. A detailed spectral analysis of the standardized series of jet stream characteristics and predictors revealed the presence of periodic oscillations in a wide spectral range – from short to long periods (30–50 months). A model is constructed that describes both the entire spectrum of temporal variations in the characteristics of jet streams, and only its long-wavelength part. It is shown that the sea ice and a group of predictors associated with variations in the temperature of the troposphere make the greatest contribution to the variations in the characteristics of jet streams. The maximum contribution of large-scale atmospheric indices to the quality of the model does not exceed 10%. In general, the multi-regression model allows us to describe up to 50–70 percent of the variability of the average area, maximum velocity, and latitudinal position of the center of the jet stream.

Keywords: high-altitude jet streams, multi-regression, spectral and wavelet analysis, satellite measurements, Arctic sea ice area, troposphere temperature, indices of large-scale processes