

Оценка прогностических возможностей вертикальных движений воздуха

Л. М. Акимов✉, Е. Л. Акимов

Воронежский государственный университет, Российская Федерация
(394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1)

Аннотация. Цель – исследование асинхронных связей момента инерции баричесентрического вращения Солнца и лапласианов давления над ограниченной территорией северного полушария при запаздываниях от 0 до 60 лет для составления долгосрочного прогноза интенсивности и направленности вертикальных токов, определяющих устойчивость атмосферы.

Материалы и методы. Использовались данные реанализа ERA-40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ежедневных значений геопотенциальных высот на поверхности 1000 гПа за период наблюдений с 1948 по 2018 гг. Основные методы исследования – графоаналитический и физико-статистический. Применялся метод корреляционного анализа момента инерции баричесентрического вращения и лапласианов давления в узлах сетки.

Результаты и обсуждение. Исследованы особенности корреляционных связей полей вертикальных токов с моментом инерции баричесентрического вращения Солнца и выявлена их временная динамика. Обнаружено, что наилучшая корреляция лапласианов с моментом инерции в полярных широтах при сдвиге 29-32 года, в умеренных широтах величина запаздывания составляет 25-27 лет. Отмечено, что наиболее тесные связи наблюдаются в зимний период. Летом теснота связи незначительная и носит очаговый характер.

Выводы. Установлена тесная связь между моментом инерции с лапласианом, которая по абсолютной величине местами превышает 0,6, свидетельствующая о существенном влиянии гравитационных сил на вертикальные движения воздуха и происходящие процессы в атмосфере.

Ключевые слова: лапласиан, геопотенциал, вертикальные движения воздуха, сдвиг, первый естественный синоптический район, экваториальная зона Северного полушария.

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

Для цитирования: Акимов Л. М., Акимов Е. Л. Оценка прогностических возможностей вертикальных движений воздуха // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 2, с. 97-105. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/81-89>

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим элементом общей циркуляции атмосферы являются вертикальные движения воздуха. Так, в основе термодинамической классификации воздушных масс лежит анализ температуры и вертикальных движений воздуха, позволяющий классифицировать их не только как теплые и холодные, но и как устойчивые и неустойчивые.

Теплый воздух, менее плотный и легче холодного, разогреваясь от поверхности земли, стремится подняться, а холодный воздух из более высоких слоев атмосферы спуститься вниз. Скорость изменения температуры с высотой определяет ее состояние: устойчивая (стабильный воздух) и неустойчивая атмосфера. При устойчивой стратификации, в стабильном воздухе, атмосфера с высотой остывает медленно и поднимающийся воздух теряет подвижность после достижения одинаковой температуры с окружающим воздухом.

В случае неустойчивой стратификации она остывает быстрее, воздух не успевает достаточно охладиться и ускоряется при вертикальном движении. В условиях неустойчивой атмосферы воздух быстро перемещается вверх и вниз. Неустойчивая атмосфера приводит к формированию грозовой облачности и интенсивному перемешиванию воздуха. В стабильном воздухе слабая турбулентность способствует появлению туманов, мороси, смога и усилению загрязнения воздуха в городах.

Вертикальные движения атмосферы являются основным элементом атмосферы, способствующим формированию турбулентности, за счет которой происходит выравнивание глобального поля температуры. Вследствие восходящих и нисходящих движений воздуха происходит нагрев и охлаждение атмосферы. Восходящие движения воздуха способствуют ее охлаждению, а нисходящие движения – нагреву. Благодаря адиабатическим процессам подъема и опускания воздуха, его турбулентному переме-

© Акимов Л. М., Акимов Е. Л., 2024

✉ Акимов Леонид Мусамудинович, e-mail: akl63@bk.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

шиванию происходит терморегуляция атмосферы, а также процессы загрязнения и самоочищения атмосферы, особенно городской среды. Поэтому изучение направления и интенсивности вертикальных движений воздуха, их долгосрочный прогноз с использованием различных предикторов являются актуальной задачей.

В синоптической метеорологии, в зависимости от природы образования, вертикальные движения воздуха делятся на следующие: «1) неупорядоченные (турбулентные); 2) упорядоченные (конвективные) в облаках Си и Сб и местные циркуляционные системы (бризы, горно-долинные ветры); 3) волновые движения различного происхождения; 4) орографические; 5) вблизи атмосферных фронтов и в центральных частях циклонов и антициклонов» [15].

Исследованию вертикальных движений посвящено большое количество авторских работ при решении прикладных задач, связанных с влиянием вертикальных движений воздуха на рассеяние или накопление загрязняющих веществ в атмосфере (Акимов Л. М. [2-4], Алюян А. Е. [5], Берлянд М. Е. [8], Бусингер Дж. А. [10] и др.). В них доказана тесная связь между поллютантами и различными индексами устойчивости атмосферы, особенно при исследовании канцерогенов. Научные исследования свидетельствуют о том, что проблема изучения вертикальных потоков в атмосфере, их влияние на чистоту атмосферного воздуха и экологическую обстановку в целом, имеет высокий научный и практический интерес, является актуальной многофакторной, требующей разностороннего подхода.

Основным методом в исследовании вертикальных токов атмосферы является анализ термодинамического состояния атмосферы с использованием данных зондирования атмосферы, ее энергетического потенциала, определяемого температурой и влагосодержанием.

Между тем, представляет особый интерес оценка зависимости вертикальных токов от глобальных астрономических факторов, а именно, от влияния основных планет солнечной системы, определяющих положение центра барицентрического движения Солнца и Земли вместе с ним. Исследованию влияния внешних факторов, в том числе и момента инерции орбитального вращения планет на вариацию климатических процессов, посвящены работы Сидоренкова Н. С. и др. [18, 20], Байдала М. Х. [6], Белязо В. А. [7], Богданова М. Б. [9], Бялко А. В. [11], Шерстюкова Б. Г. [19] и др. В работах перечисленных авторов убедительно доказана информативность влияния момента инерции барицентрического вращения Солнца на климатические параметры и дано его физическое обоснование.

Целью данной статьи является исследование асинхронных связей момента инерции барицентрического вращения Солнца и лапласианов давления над ограниченной территорией северного полушария при запаздываниях от 0 до 60 лет для составления долгосрочного прогноза интенсивности и направленности вертикальных токов, определяющих устойчивость атмосферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вращение Солнца вокруг общего центра масс Солнечной системы создает динамические силы, приложенные к Земле, которые способствуют появлению дополнительного вращательного момента в океане и атмосфере вдоль широтных кругов. Количественной оценкой такого взаимодействия может служить суммарный момент инерции орбитального вращения планет-гигантов вокруг оси, проходящей через центр масс Солнечной системы. Этот момент является динамической характеристикой барицентрического движения пары Солнце-Земля. Момент инерции барицентрического вращения Солнца определяется суммарным воздействием четырех планет-гигантов.

Для каждой планеты вычислялся момент инерции барицентрического вращения:

$$J_i = m_i r_i^2 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2] \quad (1)$$

где $i = 5, \dots, 8$ – номера планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун); m – масса планеты; r – расстояние от Солнца до планеты.

В расчетах использовались справочные сведения о массах планет и средние расстояния от Солнца до планет.

Так как момент инерции – векторная величина; то момент инерции вращения каждой планеты раскладывается на две перпендикулярные составляющие:

$$\begin{aligned} x_i &= J_i \cos(\pi / 180) \lambda_i \\ y_i &= J_i \sin(\pi / 180) \lambda_i \end{aligned} \quad (2)$$

Для каждого текущего года k за 1700-2050 годы и месяцы t вычисляем ряд сумм составляющих по четырем планетам:

$$X_{k,t} = \frac{1}{n} \sum_{k,t=1}^n \sum_{i=5}^{i=8} x_i \dots Y_{k,t} = \frac{1}{n} \sum_{k,t=1}^n \sum_{i=5}^{i=8} y_i \quad (3)$$

Скалярная величина вектора момента вращения Солнца вокруг барицентра будет:

$$P_{k,m} = \sqrt{X_{k,m}^2 + Y_{k,m}^2} \text{ [кг} \cdot \text{м}^2] \quad (4)$$

Характеристикой атмосферы служил лапласиан атмосферного давления ($\Delta^2 p$), представленный в виде:

$$\Delta^2 p = \partial^2 p / \partial x^2 + \partial^2 p / \partial y^2 = p''_{xx} + p''_{yy} \quad (5)$$

Символически оператор Лапласа Δ можно получить как скалярный квадрат оператора $\bar{\nabla}$:

$$\bar{\nabla}^2 = \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} p = (\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2) p = \Delta \quad (6)$$

Если в формуле (6) выразить $\partial p / \partial x$ и $\partial p / \partial y$ через компоненты геострофического ветра в виде:

$$\begin{aligned} \partial p / \partial x &= 2w_z \rho v_g \\ \partial p / \partial y &= -2w_z \rho u_g \end{aligned} \quad (7)$$

где $w_z = w \sin \varphi$ – проекция на ось Oz угловой скорости вращения Земли, ρ – плотность воздуха, v_g и u_g – меридиональная и зональная составляющие геострофического ветра, соответственно, то выражение лапласиана давления будет иметь вид:

$$\Delta^2 p = 2w_z \rho (\partial v_g / \partial x - \partial u_g / \partial y) + (v_g \partial / \partial x)(2w_z \rho) - (u_g \partial / \partial y)(2w_z \rho) \quad (8)$$

Выражение, находящееся в первой скобке формулы (8) описывает геострофический вихрь:

$$(\partial v_g / \partial x - \partial u_g / \partial y) = \Omega_g z. \quad (9)$$

Таким образом, лапласиан давления является характеристикой «завихренности» барического поля. Получим выражения дифференциальных операций второго порядка:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} p = \nabla \cdot \nabla p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \Delta^2 p \quad (10)$$

Следовательно, «дивергенция градиента давления является его лапласианом $\operatorname{div} \operatorname{grad} p = \Delta^2 p$ и пропорциональна среднему «градиенту» (интенсивности изменения давления вдоль радиус-вектора) в рассматриваемой области, ограниченной окружностью с радиусом r » [1].

Выбор лапласиана давления $\Delta^2 p$ в качестве основного параметра обусловлен тем, что согласно А. С. Зверева лапласиан количественно характеризует значение вертикальной составляющей вихря скорости.

На практике для вычисления лапласиана давления $\Delta^2 p$, используется прямоугольная (шахматная) расчетная сетка, представленная на рисунке 1 [1].

Вычисление производных в точке 0 осуществляют на основании метода наименьших квадратов с использованием конечно-разностных выражений. Начало координат совпадает с тем узлом широтно-долготной сетки, в которой производится расчет.

Расчетная формула оператора Лапласа для поля геопотенциальных высот изобарической поверхности 1000гПа с использованием квадратной (шахматной) сетки определяется формулами [1, 15]:

$$\nabla^2 L_{ijx} = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 H}{4(\delta s_x) \cos \varphi} (H_9 + H_{10} + H_{11} + H_{12} - 4H_0) \quad (11)$$

$$\nabla^2 L_{ijy} = \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{1}{4(\delta s_y)} (H_1 + H_2 + H_3 + H_4 - 4H_0) \quad (12)$$

где L_{ij} – значение лапласиана в заданном узле поля, H_{ij} – значения геопотенциала в точках расчетной сетки, H_0 – значения геопотенциала в центре квадрата, δs_x и δs_y – шаг регулярной сетки по долготе и широте. Расчет лапласиана давления осуществлялся вокруг каждого заданного узла. Шаг сетки δs согласно методике вычисления метеорологических величин, принят равным 500 км [14, 15], соответственно, единица измерения лапласиана гПа/500 км².

Из геометрического смысла второй производной следует, что ее значение определяет интенсивность изменения градиента функции в окрестности точки экстремума, а знак характеризует условие максимума или минимума функции:

- положительные значения лапласиана в заданном узле поля $\Delta^2 H > 0$ характеризуют циклонические вихри и ложбины. Значения лапласиана $\Delta^2 H$ для циклонов выше, чем для ложбин;

- отрицательные значения лапласиана $\Delta^2 H < 0$ отмечаются в антициклоне или гребне. Интенсивность гребня, определяемая по значению $\Delta^2 H$, может быть больше, чем в антициклоне [1, 15, 16].

Для вычисления вертикальной скорости движения воздуха используются различные подходы и методы, основанные на решении уравнений неразрывности, притока тепла в адиабатическом приближении,

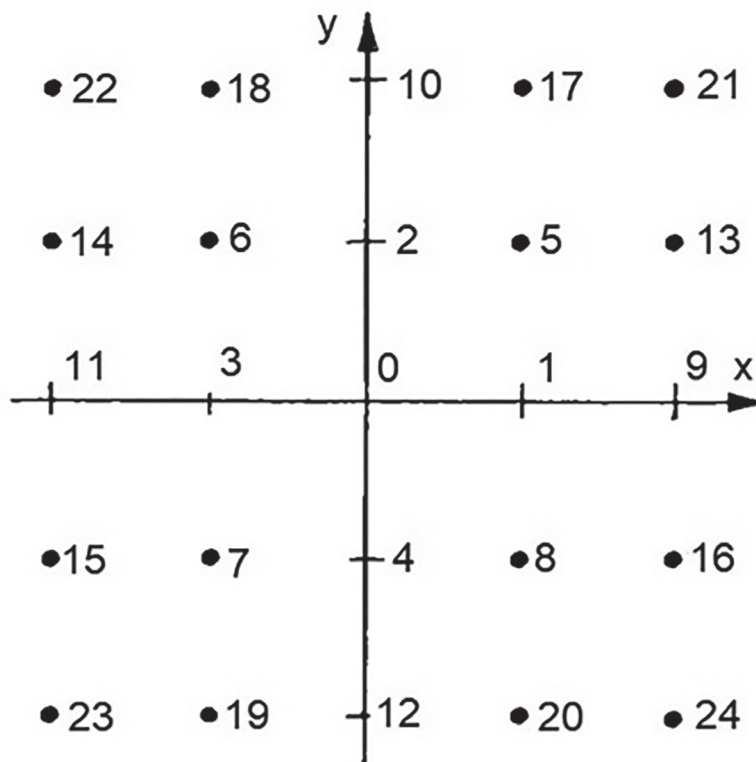


Рис. 1. Схема прямоугольной (шахматной) расчетной сетки [2]
[Fig. 1. Scheme of a rectangular (chessboard) computational grid [2]]

системы полных уравнений гидротермодинамики в геострофическом приближении, путем совместного решения уравнения неразрывности и вихря скорости (Акимов Л. М. [1-4], Груза Г. В. [13], Зверев А. С. [15], Дюбюк А. Ф. [14], Малинин В. Н. [23] и др.). Все перечисленные методы имеют довольно сложный математический аппарат.

В настоящем исследовании информационной базой послужили данные реанализа ERA-40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [21] ежедневных значений геопотенциальных высот i на поверхности 1000 гПа, представленные в виде $H_{i,t,j,\varphi,\lambda}$, в узлах регулярной сетки (φ ; λ) северного полушария с шагом $\Delta\varphi = 2,5^\circ$ по широте и $\Delta\lambda = 2,5^\circ$ по долготе, в широтной зоне φ от $0,0^\circ$ до $90,0^\circ$ с.ш., в секторе λ от $90,0^\circ$ з.д. до $90,0^\circ$ в.д. для всех календарных месяцев t , за период наблюдений j с 1948 по 2018 гг.

Сектор долгот λ распространяется от $90,0^\circ$ з.д. до $90,0^\circ$ в.д. и охватывает первый естественный синоптический район, включающий Северную Атлантику и часть Евразии, на которую распространяется влияние Атлантики. По результатам расчета ежедневных значений лапласиана были вычислены среднемесячные значения лапласианов, обобщенные за 1948-2018 годы в каждом конкретном узле (φ ; λ).

Применялся метод корреляционного анализа момента инерции барицентрического вращения и лапласианов давления в узлах сетки. Заведомо допускалась возможность запаздывания реакции атмосферного давления на внешнее воздействие, поэтому вычислялись асинхронные корреляции при запаздываниях лапласианов от 0 до 60 лет. При этом длительность рядов,

по которым вычислялись коэффициенты корреляций, всегда сохранялась 71 год. Уменьшение числа случаев в расчетах не происходило, так как ряд момента инерции использовался с 1700 года.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе выполнено исследование повторяемости разных значений сдвигов (запаздывания), при которых обнаруживалась наилучшая корреляция лапласианов с моментом инерции. Критерием отбора значимых связей были коэффициенты корреляции больше 0,45 для положительных связей и – меньше -0,45 для отрицательных связей. Подсчет числа значимых корреляций при каждом сдвиге подсчитывался отдельно для положительных и отрицательных связей. Оказалось, что чаще всего высокие корреляции появлялись при сдвигах 25-32 года. При нулевом сдвиге корреляции выше 0,45 встречались в три раза реже. Учитывая, что момент инерции содержит цикличность около 35 лет, можно предположить, что при нулевом сдвиге корреляция является статистическим следствием смещения ряда примерно на одну волну и не имеет физического смысла. Чаще наблюдались положительные и отрицательные корреляции при запаздывании 25-32 года, а в 15-16 лет – это полволны и обратная корреляция. 50 лет – это сдвиг на одну волну 25-32 года.

На рисунках 2-5 показаны карты распределения наилучших асинхронных коэффициентов корреляции при сдвигах от 25 до 32 лет, указаны наилучшие сдвиги в узлах.

Из анализа рисунка 2 видно, что в январе, распределение наилучших асинхронных коэффициентов корреляции в высоких широтах имеет квазизональную структуру, чередующихся по широтам положительных

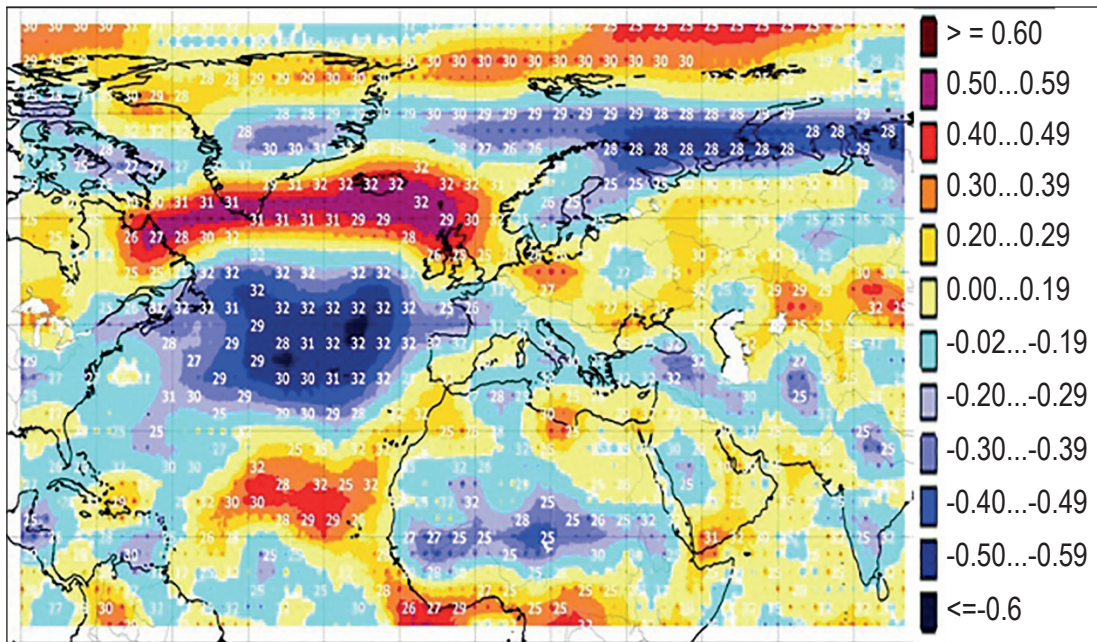


Рис. 2. Корреляции момента инерции с лапласианом с запаздыванием. 1948-2018 годы, сглаживание лапласиана по 5 годам.

Запаздывания от 25 до 32 лет. Январь F:\doc\Акимов\res_25-32

[Fig. 2. Correlations of moment of inertia with lagged Laplacian. 1948-2018, smoothing of the Laplacian over 5 years.

Lags from 25 to 32 years. January F:\doc\Акимов\res_25-32]

и отрицательных значений связей с различным запаздыванием, характеризующих чередование широтных зон с восходящими и нисходящими движениями воздуха [1, 14, 15].

На Северном полюсе, в полосе широт от $\varphi = 90,0^\circ$ до $85,0^\circ$ с.ш., находится область значимых положительных значений (больше 0,45) коэффициентов корреляции момента инерции с лапласианом давления со сдвигом 29-30 лет. Наиболее тесные связи наблюдаются в секторе от $\lambda = 30^\circ$ в.д., на широтах $\varphi = 87,5^\circ \div 90,0^\circ$ с.ш.

Вдоль полосы широт от $\varphi = 82,5$ с.ш. до $77,5^\circ$ с.ш., над континентальной частью европейской территории России, в районах интенсивных восходящих движений воздуха, наблюдаются тесные отрицательные связи (от -0,45 до -0,6) момента инерции с лапласианом давления, со сдвигом 28-29 лет. Наиболее высокий уровень корреляции наблюдается в секторе, ограниченном долготами от $\lambda = 30^\circ$ в.д. до $\lambda = 60^\circ$ в.д.

Квазизональная структура распределения асинхронных коэффициентов корреляции нарушается над Атлантическим океаном и обусловлена влиянием течений, в первую очередь конфигурацией направления осей Гольфстрима и Северо-Атлантического течения, имеющих максимальные величины лапласиана Δp вдоль них.

В широтной зоне $\varphi = 62,5^\circ \div 55,5^\circ$ с.ш., от полуострова Лабрадор вдоль южной оконечности Гренландии, островов Исландия и Ирландия, до Великобритании ($\lambda = 0,0^\circ \div 60,0^\circ$ з.д.), параллельно оси течения Гольфстрим, ограничиваясь с юга широтой $\varphi = 55,5^\circ$ с.ш., в зоне действия интенсивных восходящих движений воздуха [1, 15], располагается обширная область очень

тесной положительной связи ($>0,6$) момента инерции с лапласианом давления, со сдвигом 29-32 года.

Южная часть Атлантического океана от острова Ньюфаундленд до Пиренейского полуострова, вдоль широты $\varphi = 52,5^\circ$ с.ш. и далее на юг до $\varphi = 20,5^\circ$ с.ш., ограничиваясь долготами $\lambda = 10,0^\circ \div 60,0^\circ$ з.д., находящаяся под воздействием холодного Канарского течения, обширной очень тесной отрицательной связью ($\leq -0,6$) момента инерции с лапласианом давления, со сдвигом 29-32 года.

В остальной части территории, особенно над континентальной поверхностью, величина коэффициента корреляции момента инерции с лапласианом давления находится в пределах от 0,02 до 0,29 по абсолютной величине, с запаздыванием 28-30 лет.

Распределения наиболее высоких асинхронных коэффициентов корреляции момента инерции с лапласианом давления при сдвигах от 25 до 32 лет весной (апрель) представлены на рисунке 3.

Весной (апрель, рис. 3), наблюдается существенное усиление положительной тесноты связи (более 0,6) в полярных широтах, вдоль широты $\varphi = 87,5^\circ$ с.ш., ограниченной долготами $\lambda = 30,0^\circ \div 90,0^\circ$ в.д. с запаздыванием 29-30 лет.

Теснота положительной корреляционной связи момента инерции с лапласианом давления, в широтной зоне $\varphi = 62,5^\circ \div 55,5^\circ$ с.ш. ослабевает до уровня 0,4 – 0,49, со сдвигом 25 лет. Сама область смещается на более высокие широты вдоль побережья южной оконечности Гренландии от п-ова Лабрадор до Гринвичского (нулевого) меридиана.

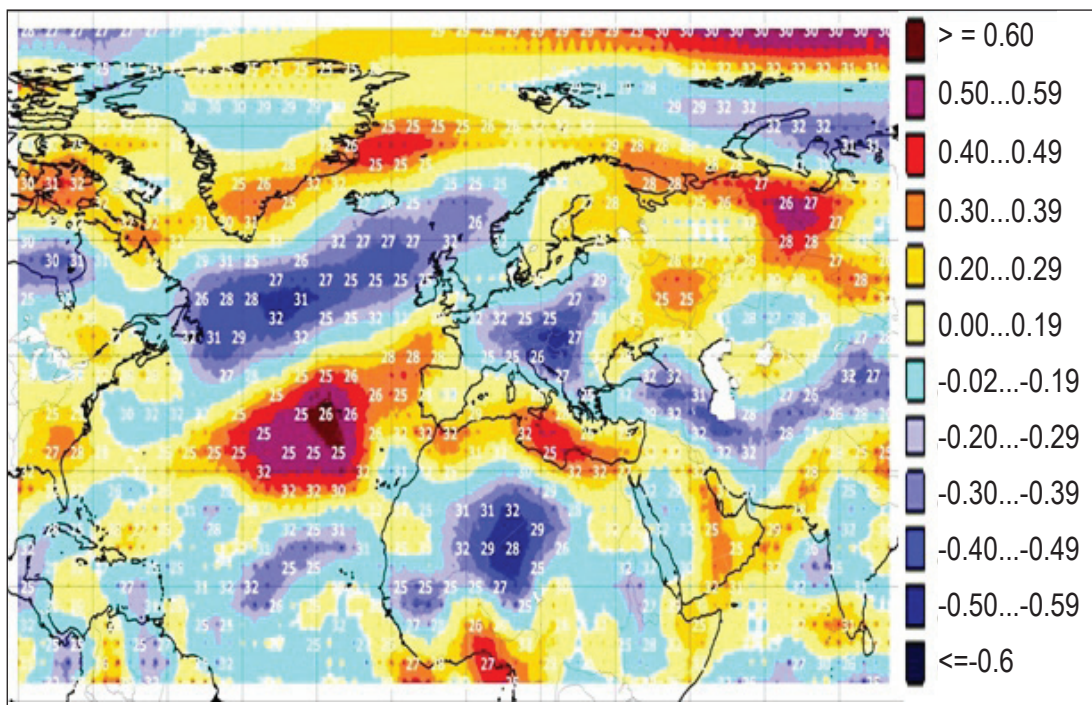


Рис. 3. Корреляции момента инерции с лапласианом с запаздыванием. 1948-2018 годы, сглаживание лапласиана по 5 годам. Запаздывания от 25 до 32 лет. Апрель F:\doc\Akimov\res_25-32

[Fig. 3. Correlations of moment of inertia with lagged Laplacian. 1948-2018, smoothing of the Laplacian over 5 years. Lags from 25 to 32 years. April F:\doc\Akimov\res_25-32]

От интенсивной области отрицательной корреляционной связи вдоль полосы широт от $\varphi = 82.5^\circ$ с.ш. до 77.5° с.ш., над континентальной частью европейской территории России остался небольшой островок с теснотой связи от -0,20 до -0,39, со сдвигом 31 – 32 года, ограниченный долготами $\lambda = 60.0^\circ \div 90.0^\circ$ в.д.

В районе Атлантического океана в апреле произошла смена знака, тесноты связи момента инерции с лапласианом давления. На месте области положительных корреляционных связей от острова Ньюфаундленд до Скандинавского полуострова, ограниченной с севера островом Исландия, а с юга Британскими островами, расположена область с отрицательным знаком тесноты связи (от -0,4 до -0,59) с запаздыванием 28-32 года.

На месте обширной зоны отрицательной корреляционной связи наблюдается область положительной связи с величиной тесноты от 0,5 до более 0,6, с запаздыванием 25-26 лет, ограниченная координатами по широте $\varphi = 27.5^\circ \div 33.5^\circ$ с.ш. и долготами $\lambda = 45.0^\circ \div 27.5^\circ$ з.д.

Над центральной частью Западной Европы сформировался обширный очаг высокой отрицательной корреляционной связи (от -0,5 до -0,59) момента инерции с лапласианом давления с запаздыванием 25-27 лет.

На севере Среднесибирского плоскогорья расположен очаг интенсивной ($\geq 0,6$) положительной корреляционной связи момента инерции с лапласианом с запаздыванием 26-27 лет.

Распределение тесноты связи момента инерции с лапласианом, а также время их запаздывания в летний сезон, для июля, представлено на рисунке 4.

Из анализа рисунка 4 можно сделать вывод, что летом (июль), практически на всей рассматриваемой территории, по сравнению с зимним периодом, наблюдается существенное понижение тесноты связи момента инерции с лапласианом. Фактически над всей континентальной частью рассматриваемой территории и над Атлантикой он находится в пределах $0,2 \div 0,29$ по абсолютной величине. Уровень связи на Северном полюсе не превышает значений $0,4 \div 0,49$. Время запаздывания в среднем по всей территории составляет 25-27 лет. Единственным значимым очагом с теснотой отрицательной связи $-0,5 \div -0,59$ наблюдается над центральной частью Западной Европы с запаздыванием 26-28 лет, а также на севере Африки с уровнем положительной связи $0,5 \div 0,59$ и запаздыванием 27-30 лет.

Осенью (октябрь, рис. 5) происходит перестройка связей на «зимний лад».

Наблюдается повышение общего уровня корреляционной связи момента инерции с лапласианом до значений $0,4-0,49$ по абсолютной величине, с запаздыванием 29-32 года, в умеренных широтах 25-27 лет. Наиболее тесные положительные связи наблюдаются в полярных широтах (более 0,6) вдоль 80° с.ш., с запаздыванием 29-32 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена тесная связь между моментом инерции с лапласианом, по абсолютной величине превышающая 0,6, что свидетельствует о существенном влиянии гравитационных сил на вертикальные движе-

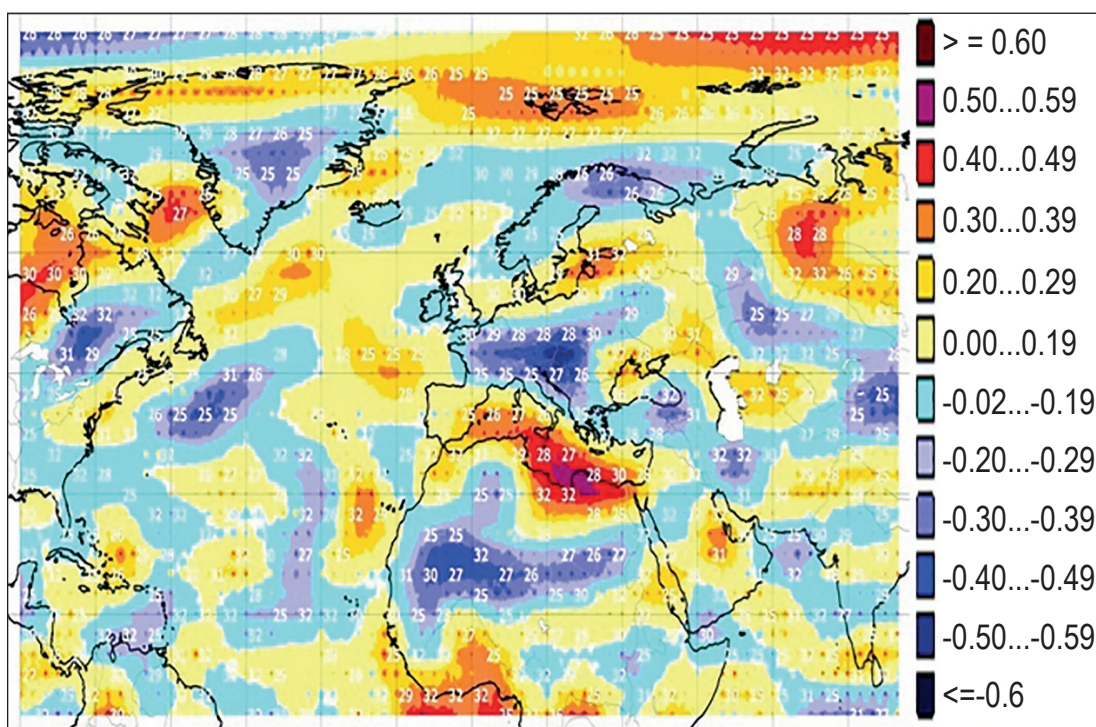


Рис. 4. Корреляции момента инерции с лапласианом с запаздыванием. 1948-2018 годы, сглаживание лапласиана по 5 годам.

Запаздывания от 25 до 32 лет. Июль F:\doc\Акимов\res_25-32

[Fig. 4. Correlations of moment of inertia with lagged Laplacian. 1948-2018, smoothing of the Laplacian over 5 years.

Lags from 25 to 32 years. July F:\doc\Акимов\res_25-32]

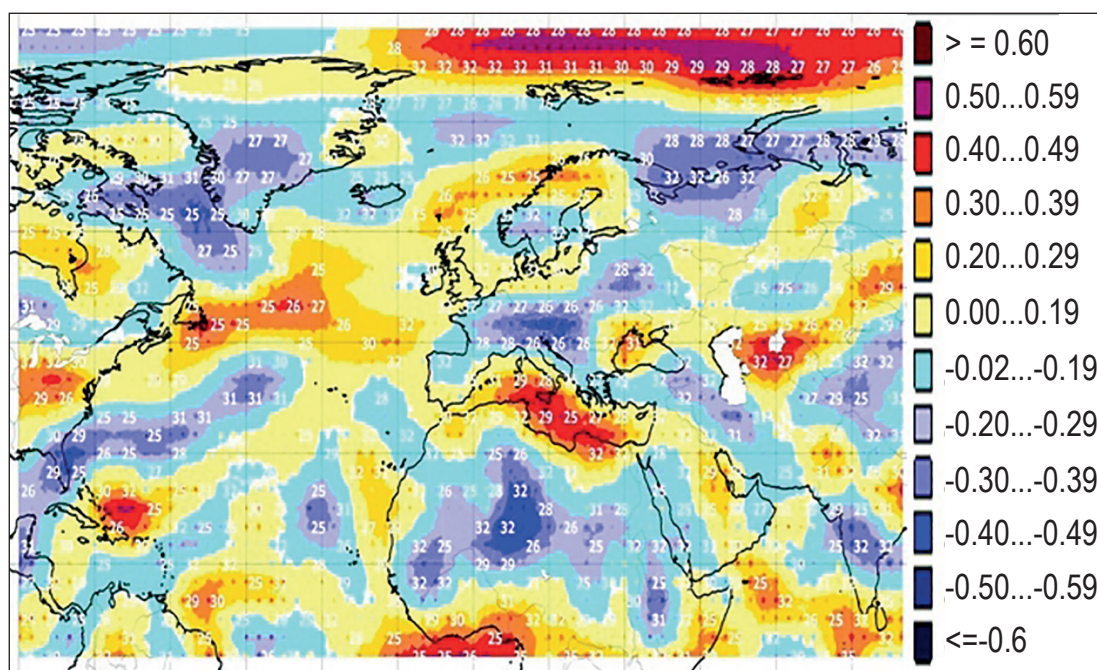


Рис. 5. Корреляции момента инерции с лапласианом с запаздыванием. 1948-2018 годы, сглаживание лапласиана по 5 годам. Запаздывания от 25 до 32 лет. Октябрь F:\doc\Акимов\res_25-32
 [Fig. 5. Correlations of moment of inertia with lagged Laplacian. 1948-2018, smoothing of the Laplacian over 5 years. Lags from 25 to 32 years. October F:\doc\Акимов\res_25-32]

ния воздуха и происходящих процессов в атмосфере. Наиболее тесные связи наблюдаются в зимний период. Летом теснота связи незначительная и носит очаговый характер. Такое различие в уровне тесноты связи обусловлено тем, что зимой на рассматриваемой территории процессы более стационарны. Синоптическая обстановка зимой определяется действием двух мощных центров действия, а именно, над континентом Сибирским антициклоном, а над Атлантикой – Исландским минимумом. Летом над континентом наблюдается более пёстрая синоптическая картина, характеризующаяся чередованием циклонов и антициклонов, тем самым увеличивается число факторов, определяющих интенсивность и характер вертикальных движений ветра. Повторяемость разных значений сдвигов (запаздывания), при которых обнаруживалась наилучшая корреляция лапласианов с моментом инерции, в полярных широтах 29-32 года, в умеренных широтах 25-27 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Л. М. Анализ вертикальных движений воздуха над Атлантико-Европейским сектором // *Географический вестник*, 2021, № 2 (57), с. 96-109.
2. Акимов Л. М., Акимов Е. Л. Оценка роли метеорологических условий в формировании аэротехногенного загрязнения городской среды // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 3, с. 68-78.
3. Акимов Л. М., Акимов Е. Л. Пространственно-временные закономерности формирования аэротехногенного загрязнения атмосферы в условиях вертикальной «неустойчивости» в Центральном Черноземье // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*, 2023, т. 17, № 2, с. 11-22.

4. Акимов Л. М., Задорожная Т. Н. Методика прогноза суточной продолжительности инверсионной облачности, способствующей загрязнению воздушной среды в пункте Воронеж // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2013, № 1, с. 200-205.
5. Алоян А. Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей в атмосфере. Москва: Наука, 2005. 400 с.
6. Байдал М. Х. О временной сопряженности некоторых климатических характеристик с внешними факторами // *Труды ВНИИГМИ МЦД*, 1987, вып. 141, с. 23-28.
7. Белязо В. А. Планетные циклы в колебаниях атмосферной циркуляции и их проявление в некоторых процессах Арктики // *Труды ААНИИ*, 1999, т. 441, с. 46-51.
8. Берлянд М. Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.
9. Богданов М. Б., Сурков А. Н. О возможности влияния движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы на изменение климата // *Известия Саратовского университета*, 2004, т. 4, вып. 1-2, с. 146-148.
10. Бусингер Дж. А. *Основные понятия и уравнения. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. 338 с.
11. Бялко А. В. Релаксационная теория климата // *Успехи физических наук*, 2012, т. 182, № 1, с. 111-116.
12. Воробьев В. И. *Синоптическая метеорология*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1991. 616 с.
13. Груза Г. В., Петросянц М. А. О роли орографии в энергетическом состоянии атмосферы // *Труды САНИГМИ*, 1965, вып. 29 (38).
14. Дюбюк А. Ф. К вычислению вертикальных скоростей по полю давления // *Труды НИУ УГМС*, 1947, сер. II, вып. 24.
15. Зверев А. С. *Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды*. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1968. 776 с.
16. Малинин В. Н., Радикевич В. М., Гордеева С. М., Куликова Л. А. *Изменчивость вихревой активности атмосферы*

ры над Северной Атлантикой. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1996. 172 с.

17. Матвеев Л. Т. Условия образования и эволюции облаков под влиянием вертикальных токов и турбулентного обмена // Известия АН СССР. Серия геофизическая, 1961, № 1, с. 130-140.

18. Сидоренков Н. С. Атмосферные процессы и вращение Земли. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2002. 366 с.

19. Шерстюков Б. Г. Динамическая синхронизация колебаний климата океана с барическим движением Солнца // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2021, т. 85, № 3, с. 380-391.

20. Sidorenkov N. S. *The interaction between Earth's rotation and geophysical processes*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. 305 p.

21. *Physical Sciences Laboratory*. – URL: https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/DBListFiles.pl?did=192&tid=89260&vid=14 (accessed 09.01.2023). – Text: electronic.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 12.09.2023

Принята к публикации: 28.05.2024

ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

UDC 551.554

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/81-89>

Assessment of the Predictive Capabilities of Vertical Air Movements

L. M. Akimov✉, E. L. Akimov

Voronezh State University, Russian Federation
(1, Universitetskaya sq., Voronezh, 394018)

Abstract. The purpose is to investigate asynchronous relations of the moment of inertia of the Sun's barycentric rotation and pressure Laplacians over a limited area of the northern hemisphere at lags from 0 to 60 years to make a long-term forecast of the intensity and direction of vertical currents that determine the stability of the atmosphere.

Materials and Methods. Data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts ERA-40 reanalysis of daily 1000 hPa surface geopotential heights for the observation period from 1948 to 2018 were used. The main research methods are graph-analytical and physical-statistical. The method of correlation analysis of the moment of inertia of barycentric rotation and pressure Laplacians in the grid nodes was used.

Results and discussion. The peculiarities of the correlation relations between the fields of vertical currents and the moment of inertia of the Sun's barycentric rotation have been investigated and their temporal dynamics has been revealed. It was found that the best correlation of Laplacians with the moment of inertia in polar latitudes is at a shift of 29-32 years, in temperate latitudes the lag value is 25-27 years. It was noted that the closest correlations are observed in winter. In summer, the closeness of the connection is insignificant and has a focal character.

Conclusions. A close relationship between the moment of inertia and the Laplacian has been established, which in absolute value exceeds 0.6 in some places, indicating a significant influence of gravitational forces on the vertical air movements and the ongoing processes in the atmosphere.

Keywords: Laplacian, geopotential, vertical air movements, shear, first natural synoptic region, equatorial zone of the Northern Hemisphere.

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>

For citation: Akimov L. M., Akimov E. L. Assessment of the Predictive Capabilities of Vertical air Movements. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2024, no. 2, pp. 97-105. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/81-89>

REFERENCES

1. Akimov L. M. Analiz vertikal'nykh dvizheniy vozdukh nad Atlantiko-Evropeyskim sektorom [Analysis of vertical air movements over the Atlantic-European sector]. *Geograficheskiy vestnik*, 2021, no. 2 (57), pp. 96-109. (In Russ.)

2. Akimov L. M., Akimov E. L. Otsenka roli meteorologicheskikh usloviy v formirovanii aerotekhnogenogo zagryazneniya gorodskoy sredy [Assessment of the role of meteorological conditions in the formation of aerotechnogenic pollution of the urban environment]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstven-*

© Akimov L. M., Akimov E. L., 2024

✉ Leonid M. Akimov, e-mail: akl63@bk.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

nogo universiteta. *Seria: Geografia. Geoekologia*, 2023, no. 3, pp. 68-78. (In Russ.)

3. Akimov L.M., Akimov E.L. Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti formirovaniya aerotekhnogennogo zagryazneniya atmosfery v usloviyakh vertikal'noy «neustoychivosti» v Tsentral'nom Chernozem'e [Spatial and temporal patterns of formation of aerotechnogenic atmospheric pollution in conditions of vertical «instability» in the Central Chernozem region]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 11-22. (In Russ.)

4. Akimov L.M., Zadorozhnaya T.N. Metodika prognoza su-tochnoy prodolzhitel'nosti inversionnoy oblachnosti, sposobstvuyushchey zagryazneniyu vozduшной sredy v punkte Voronezh [Methodology for forecasting the daily duration of inversion clouds contributing to air pollution in Voronezh]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2013, no. 1, pp. 200-205. (In Russ.)

5. Aloyan A.E. *Modelirovanie dinamiki i kinetiki gazovykh primesey v atmosphere* [Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities in the atmosphere]. Moscow: Nauka, 2005. 400 p. (In Russ.)

6. Baydal M.Kh. O vremennoy sopryazhennosti nekotorykh klimaticheskikh kharakteristik s vneshnimi faktorami [On the temporal conjugation of some climatic characteristics with external factors]. *Trudy VNIIGMI MTsD*, 1987, v. 141, pp. 23-28. (In Russ.)

7. Belyazo V.A. Planetye tsikly v kolebaniyakh atmosfery [Planetary cycles in atmospheric circulation fluctuations and their manifestation in some Arctic processes]. *Trudy AANII*, 1999, vol. 441, pp. 46-51. (In Russ.)

8. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecast and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 272 p. (In Russ.)

9. Bogdanov M.B., Surkov A.N. O vozmozhnosti vliyaniya dvizheniya Solntsa otnositel'no tsentra mass Solnechnoy sistemy na izmenenie klimata [On the possibility of the influence of the movement of the Sun relative to the center of mass of the Solar system on climate change]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta*, 2004, vol. 4, v. 1-2, pp. 146-148. (In Russ.)

10. Businger Dzh.A. *Osnovnye ponyatiya i uravneniya. Atmosfernaya turbulentnost' i modelirovaniye rasprostraneniya primesey* [Basic concepts and equations. Atmospheric turbulence and modeling of impurity propagation]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 338 p. (In Russ.)

11. Byalko A.V. Relaksatsionnaya teoriya klimata [Relaxation theory of climate]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, no. 1, pp. 111-116. (In Russ.)

12. Vorob'ev V.I. *Sinopticheskaya meteorologiya* [Synoptic meteorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 616 p. (In Russ.)

13. Gruza G.V., Petrosyants M.A. O roli orografii v energeticheskom sostoyanii atmosfery [On the role of spelling in the energetic state of the atmosphere]. *Trudy SANIGMI*, 1965, v. 29 (38). (In Russ.)

14. Dyubyuk A.F. K vychisleniyu vertikal'nykh skorostey po polyu davleniya [To calculate vertical velocities in the pressure field]. *Trudy NIU UGMS*, 1947, ser. II, v. 24. (In Russ.)

15. Zverev A.S. *Sinopticheskaya meteorologiya i osnovy predvychisleniya pogody* [Synoptic meteorology and the basics of weather forecasting]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1968. 776 p. (In Russ.)

16. Malinin V.N., Radikevich V.M., Gordeeva S.M., Kulikova L.A. *Izmenchivost' vikhrevoy aktivnosti nad Severnoy Atlantikoy* [Variability of atmospheric vortex activity over the North Atlantic]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996. 172 p. (In Russ.)

17. Matveev L.T. Usloviya obrazovaniya i evolyutsii oblakov pod vliyaniem vertikal'nykh tokov i turbulentnogo obmena [Conditions of cloud formation and evolution under the influence of vertical currents and turbulent exchange]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geofizicheskaya*, 1961, no. 1, pp. 130-140. (In Russ.)

18. Sidorenkov N.S. *Atmosfernye protsessy i vrashchenie Zemli* [Atmospheric processes and the rotation of the Earth]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002. 366 p. (In Russ.)

19. Sherstyukov B.G. *Dinamicheskaya sinkhronizatsiya kolebaniy klimata okeana s baritsentricheskim dvizheniem Solntsa* [Dynamic synchronization of ocean climate fluctuations with the barycentric movement of the Sun]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 3, pp. 380-391. (In Russ.)

20. Sidorenkov N.S. *The interaction between Earth's rotation and geophysical processes*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. 305 p.

21. *Physical Sciences Laboratory*. – URL: https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/DBListFiles.pl?did=192&tid=89260&vid=14 (accessed 09.01.2023). – Text: electronic.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 12.09.2023

Accepted: 28.05.2024

Акимов Леонид Мусамудинович
кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Акимов Евгений Леонидович
кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4909-4290, e-mail: akimovvsu@gmail.com

Leonid M. Akimov
Cand. Sci. (Geogr), Assoc. Prof., Head of the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Evgeniy L. Akimov
Cand. Sci. (Geogr), Assoc. Prof. at the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4909-4290, e-mail: akimovvsu@gmail.com