

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 504.38

Вертикальный масштаб для профилей водяного пара и соединений серы в нижней тропосфере

А.В. Елисеев^{✉ 1–4}, А.В. Тимажев², П.Л. Хименес^{3*}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

³Казанский (Приволжский) федеральный университет
420097, г. Казань, ул. Товарищеская, 5

⁴Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.
после доработки 12.04.2022 г.
принята к публикации 16.05.2022 г.

Проведен глобальный анализ географических особенностей вертикальных профилей удельной влажности воздуха и концентраций диоксида серы и сульфатных аэрозолей по данным реанализа CAMS, а также высоты планетарного пограничного слоя (ППС) по данным реанализа ERA5 для 2003–2020 гг. В качестве характеристики указанных профилей использовался вертикальный масштаб H_Y , т.е. высота, на которой концентрация вещества Y уменьшается в e раз. Максимумы высоты верхней границы ППС отмечены в регионах преобладающей циклонической циркуляции — в шторм-треках и в регионах муссонной циркуляции летом. Для вертикального масштаба профиля удельной влажности выявлены минимумы в регионах субтропических круговоротов с преобладающим крупномасштабным опусканием воздушных масс. Вертикальный масштаб профиля концентрации SO_2 характеризуется пространственными минимумами, связанными с окислением диоксида серы. Для H_{SO_4} определен пространственный минимум над океаном вблизи Юго-Восточной Азии. Выявлены статистически значимая отрицательная корреляция между толщиной ППС и вертикальным масштабом профиля удельной влажности во влажных регионах тропиков, а также положительная корреляция между вертикальными масштабами профилей концентраций диоксида серы и сульфатов, наиболее значимо проявляющаяся в регионах с сильным загрязнением нижней тропосферы этими веществами.

Ключевые слова: диоксид серы, сульфаты, удельная влажность, вертикальный масштаб, планетарный пограничный слой, корреляционные связи; sulfur dioxide, sulfates, specific humidity, vertical scale, planetary boundary layer, correlation relationships.

Введение

Одна из особенностей нижней тропосферы Земли — универсальная структура вертикальных профилей атмосферных примесей, источники которых находятся на поверхности Земли [1–3]. При этом зависимость от высоты над поверхностью z и для концентрации, и для отношения смеси имеет вид

$$q_Y(z) = q_Y(0) \exp(-z/H_Y), \quad (1)$$

где нижний индекс Y указывает на вещество, а H_Y — масштаб высоты для этого вещества, т.е. высота, на которой концентрация вещества Y уменьшается в e раз. Соотношение (1) позволяет, в частности,

связать общее содержание этой примеси в столбе единичной площади с ее приземной концентрацией [4]:

$$B_Y = q_Y(0)H_Y. \quad (2)$$

Для этого необходимо, чтобы $H_Y < H$, где H — высота однородной атмосферы. В свою очередь, (1) и (2) могут быть использованы в упрощенных моделях атмосферы, в том числе в моделях Земной системы промежуточной сложности [5–11]. При формулировке моделей этого класса часто используется предположение о том, что временные масштабы для процессов, определяющих структуру вертикального профиля $q_Y(z)$, заметно меньше временных масштабов процессов, явно разрешаемых такой моделью [5, 7].

Соотношение (1) можно обосновать при одновременном выполнении двух условий: 1) источники

* Алексей Викторович Елисеев (eliseev.alexey.v@gmail.com); Александр Владимирович Тимажев (timazhev@ifaran.ru); Леонардо Пеарсе Хименес (leonardojimenez1990@gmail.com).

(эмиссии и/или химическое образование) примеси находятся на поверхности Земли; 2) вертикальный перенос примеси является результатом двух процессов — диффузии и гравитационного оседания [2]. Однако это соотношение может быть справедливым и для веществ, для которых влажное вымывание доминирует в выведении из атмосферы, например для сульфатных аэрозолей [1, 2] или водяного пара [3].

Вертикальный масштаб H_Y может существенно зависеть не только от выбора вещества Y , но и от состояния пограничного слоя атмосферы, т.е. от географической точки и от времени. Подобные вариации отмечены, в частности, в [1]. На простейшем уровне их причины можно понять из изложенной в [2] теории сухого осаждения примесей атмосферы, согласно которой

$$H_Y = H / (1 + u_{T,Y} H / K_{z,Y}), \quad (3)$$

где $u_{T,Y}$ — терминальная скорость (зависящая от плотности частиц примеси, их размеров и формы); $K_{z,Y}$ — постоянный по высоте коэффициент вертикальной диффузии для вещества Y . Ввиду связи коэффициента диффузии $K_{z,Y}$ с особенностями стратификации планетарного пограничного слоя (ППС) возможно $0 \leq H_Y \leq H$.

Следует также иметь в виду, что высота верхней границы ППС относительно Земли H_{BL} зависит от коэффициента диффузии для количества движения в сухом воздухе $K_{z,air}$ [12]. В частности, при экмановском приближении для ППС справедливо

$$H_{BL,E} = (2K_{z,air} / f)^{1/2}, \quad (4)$$

где f — параметр Кориолиса. С учетом связи коэффициентов молекулярной диффузии для разных веществ с их молекулярными массами [13] можно считать, что все $K_{z,Y}$ (включая и $K_{z,air}$) при данном состоянии ППС отличаются между собой лишь на постоянные (зависящие только от вещества Y) коэффициенты. Таким образом, исходя из (3) и (4), можно ожидать положительную связь между H_Y и H_{PBL} .

Цель настоящей работы — анализ вертикальных профилей сульфатных аэрозолей ($Y = SO_4$) и их основного химического предшественника — сернистого газа ($Y = SO_2$). Кроме того, значение H_Y проанализировано и для водяного пара ($Y = \text{var}$). Последнее связано как с использованием соотношения (1) для описания вертикального распределения водяного пара в тропосфере [3], так и с важностью этой переменной для химических преобразований соединений серы в атмосфере [4, 14]. Наконец, в работе анализируется высота верхней границы ППС относительно поверхности Земли H_{PBL} .

Все проанализированные примеси напрямую влияют на оптические свойства атмосферы. Водяной пар — сильнейший парниковый газ [15]; он также влияет на оптические свойства атмосферы в солнечном диапазоне [15]. Кроме того, его содержание в атмосфере влияет на образование облаков, которые модифицируют перенос солнечного и теплового излучения [15, 16]. Сульфатные аэрозоли за счет прямого рассеяния солнечного излучения и моди-

фикации характеристик облачности облаков также существенно влияют на перенос солнечного излучения в атмосфере Земли [15, 17, 18]. Диоксид серы — важнейший химический предшественник сульфатных аэрозолей [2]. Он влияет на фотосинтез растительности и косвенно — на содержание в атмосфере углекислого газа — еще одного важного парникового газа [14, 19–21].

1. Материалы и методы

Анализ проводился по среднемесячным данным реанализа CAMS (Copernicus Atmospheric Monitoring Service) [22] и реанализа ERA5 [23] для 2003–2020 гг. Из первого массива данных для анализа были использованы удельная влажность (переменная q по номенклатуре CAMS) и отношения смеси для диоксида серы (SO_2) и сульфатного аэрозоля ($aermr11$) на изобарических уровнях в слое от 950 до 600 гПа. Ввиду того, что все указанные газы являются малыми примесями, отношение смеси для них считалось эквивалентным концентрации. Кроме того, была проанализирована высота верхней границы ППС (переменная blh по номенклатуре ERA5). Отметим, что в реанализе ERA5 высота верхней границы ППС определяется как минимальная высота над поверхностью Земли, на которой число Ричардсона достигает 0,25 [24].

Удельная влажность и концентрации диоксида серы и сульфатного аэрозоля были приближены соотношением (1) в виде линейной регрессии $\ln(q_Y(z)/q_Y(0))$, коэффициенты которой были оценены с использованием функции `regCoef_n` пакета NCL (NCAR Command Language). Высота z отсчитывалась от уровня моря и была приближена величиной, пропорциональной $\ln(p/p_0)$, где p — давление на данном изобарическом уровне, $p_0 = 950$ гПа. Из рассмотрения исключались узлы сетки с орографией выше изобарического уровня p_0 , а также с $H_Y > 3$ км. Последнее связано с тем, что в таких узлах либо концентрация вещества Y мала относительно других регионов (и, таким образом, вертикальный профиль этой концентрации трудно измерить), либо возникают инверсии в ППС (что делает соотношение (1) неприменимым).

Вычисление в работе среднеглобальных и среднегодовых значений всех H_Y (в дальнейшем обозначаемых как $H_Y^{(g)}$) проводится только в узлах сетки, не исключенных из рассмотрения по указанным выше причинам.

2. Результаты

2.1. Средние многолетние значения толщины планетарного пограничного слоя и вертикальных масштабов для примесей атмосферы

Высота ППС относительно поверхности Земли характеризуется меньшими значениями над сушей и океаном высоких и субполярных широт

(до 0,7 км) по сравнению с океаном в более низких широтах (от 0,6 до 1,8 км) (рис. 1). При этом в регионах интенсивной синоптической активности (в частности, в регионах шторм-треков), характеризующихся циклонической циркуляцией с восходящими токами воздуха в нижней тропосфере, высоты ППС максимальны. В последнем случае также заметно увеличение H_{BL} зимой соответствующего полушария, когда синоптические процессы более активны, чем летом.

Летом также проявляется максимум H_{PBL} на юге и юго-востоке Евразии, превышающий в ряде регионов 1,8 км (рис. 1, в). Он связан с развитием муссонной циклонической циркуляции в этот сезон. В меньшей степени указанный максимум проявляется весной (рис. 1, б).

Следует отметить, что в соответствии с (4) такое изменение толщины ППС можно интерпретировать как увеличение $K_{z, air}$ при сильной циклонической активности [25], проявляющееся в развитии конвективных процессов в толще ППС.

Вертикальный масштаб для удельной влажности H_{var} над океанами, как правило, находится в интервале 1,4–2,2 км (рис. 2). Минимальные значения при этом отмечаются в регионах субтропических круговоротов с преобладанием антициклонических условий, т.е. с преобладающим крупномасштабным опусканием воздушных масс. Зимой H_{var} в целом ниже, чем летом.

Над сушей значения H_{var} больше, чем над океанами: от 2,2 км и выше. В отличие от океанических регионов вертикальный масштаб для удельной влажности зимой больше, чем летом.

Межгодовое среднеквадратическое отклонение (МСКО) среднесезонных значений H_{var} в большинстве регионов составляет ~0,1 км, за исключением регионов внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), где оно может достигать 0,3 км.

При глобальном и годовом осреднении $H_{var}^{(g)} = 2,5 \pm 0,1$ км.

Годовой ход вертикального масштаба для концентрации сернистого газа H_{SO_2} над сушей выражен относительно слабо. Однако при этом отмечается существенное различие между регионами с большим и меньшим загрязнением атмосферы диоксидом серы. В первом случае (юг и юго-восток Азии, Европа, восток Северной Америки) этот вертикальный масштаб изменяется в интервале от 0,6 до 2,2 км (рис. 3).

Над океаном минимумы H_{SO_2} отмечаются в тропиках — не более 1,5 км, как и над регионами с высоким загрязнением тропосферы сульфатами (рис. 5, с, е; 6, с, е и 7, с, е из [4]). Последнее, по-видимому, указывает на влияние на вертикальный масштаб химического окисления диоксида серы с образованием сульфатных аэрозолей.

МСКО H_{SO_2} над океаном заметно больше соответствующей величины для удельной влажности.

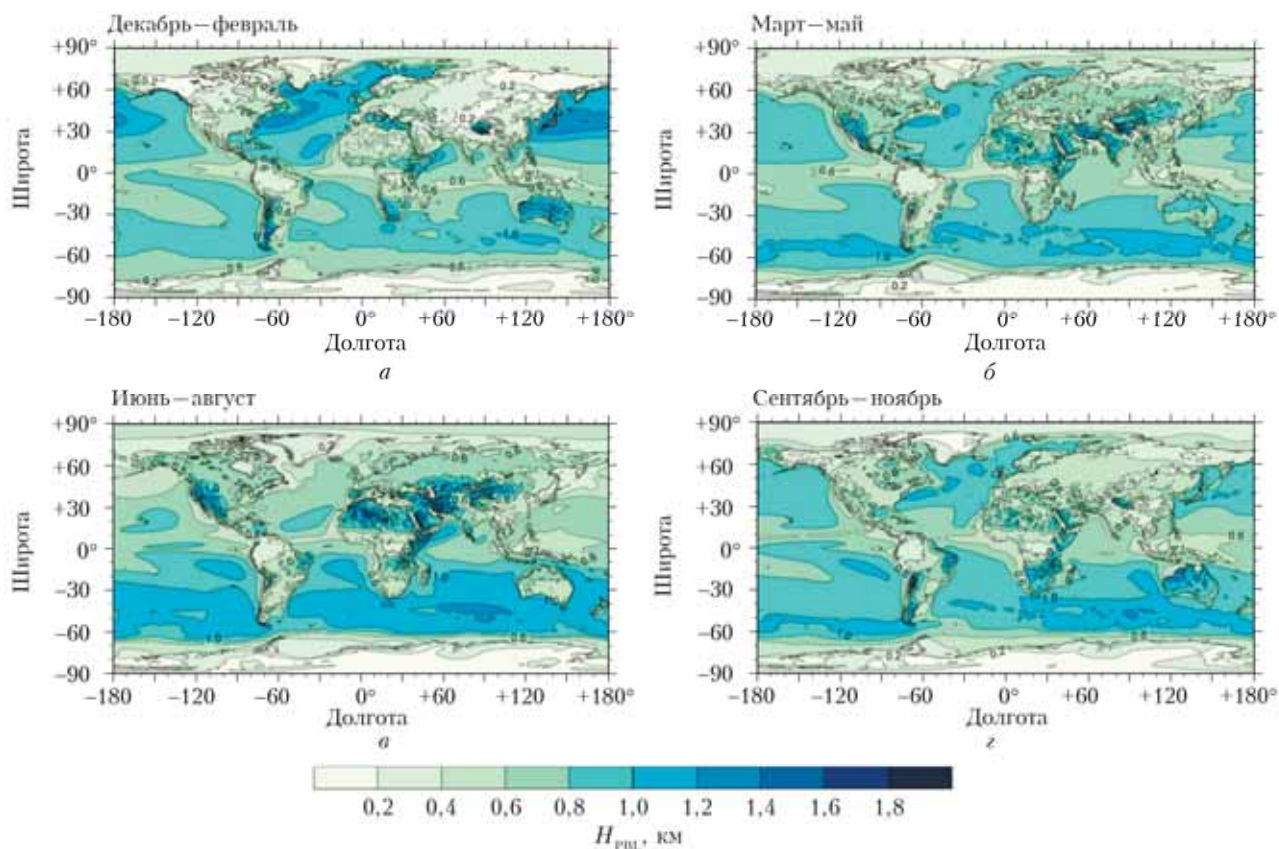


Рис. 1. Осредненная за 2003–2020 гг. среднесезонная высота верхней границы ППС относительно поверхности Земли зимой (а), весной (б), летом (в) и осенью (г) (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.07>)

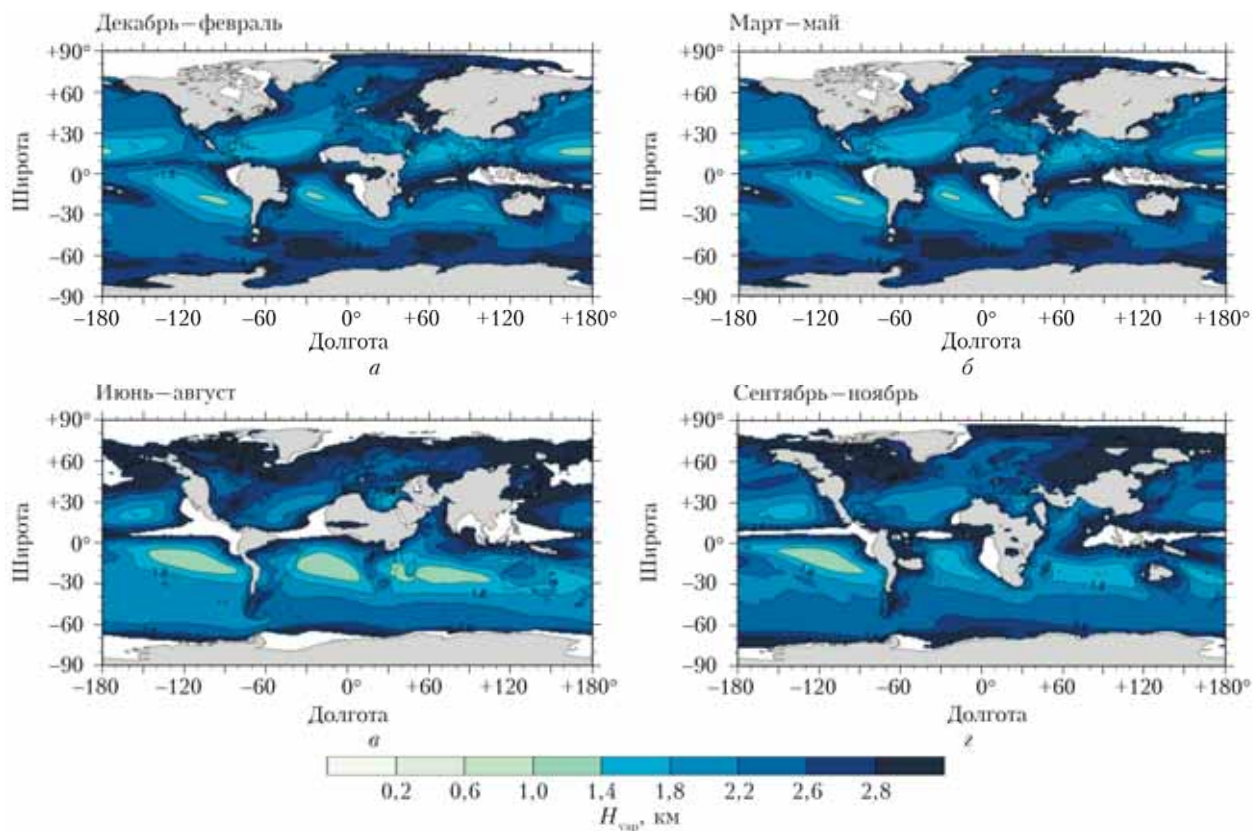


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для вертикального масштаба удельной влажности зимой (*а*), весной (*б*), летом (*в*) и осенью (*г*) (цв. рисунок см. на <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.07>)

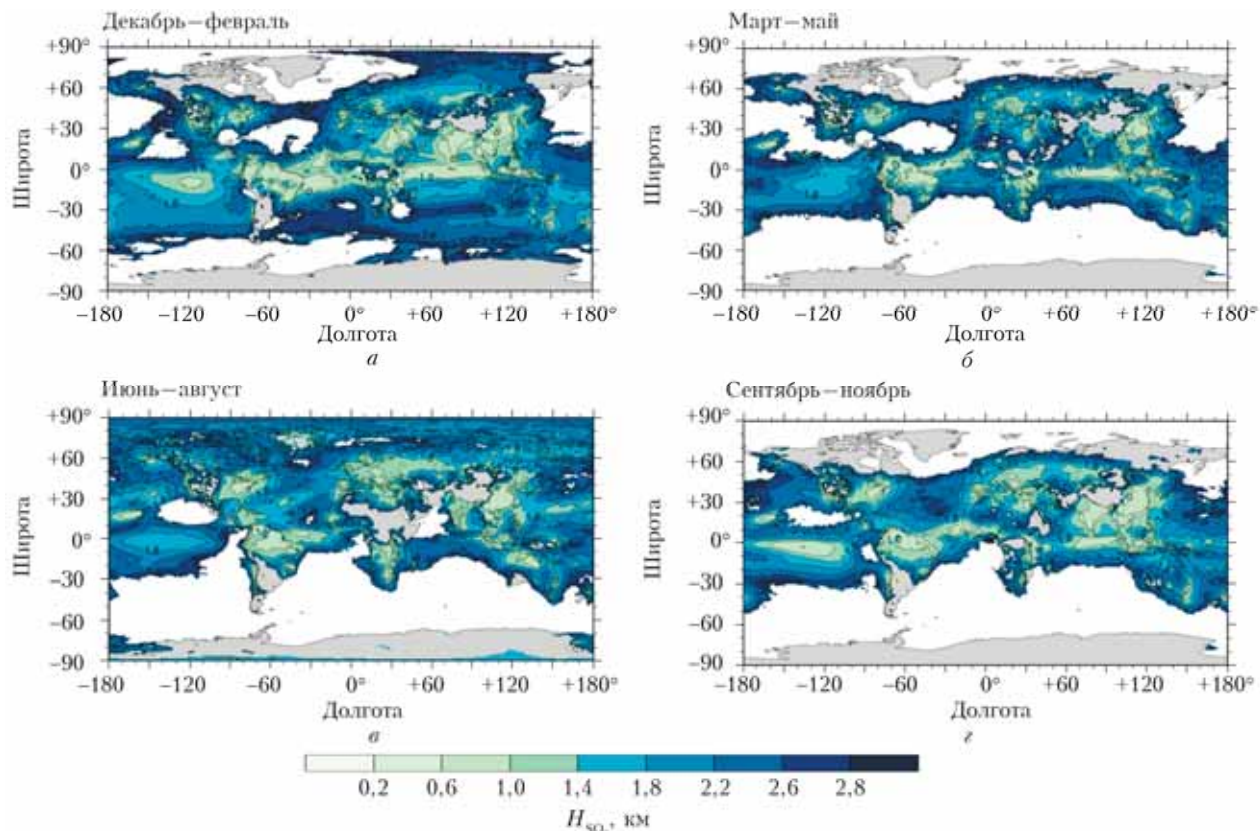


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для вертикального масштаба концентрации диоксида серы зимой (*а*), весной (*б*), летом (*в*) и осенью (*г*) (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.07>)

Над большинством океанических регионов оно меняется от 0,3 до 0,5 км, а в регионе ВЗК может даже превышать 1,0 км. Подобные большие значения также отмечаются над Северным Ледовитым океаном летом. Над сушей МСКО H_{SO_2} , как правило, не превышает 0,3 км. При глобальном и годовом осреднении $H_{\text{SO}_2}^{(g)} = 2,6 \pm 0,2$ км.

Вертикальный масштаб для концентрации сульфатов H_{SO_4} определяется хуже, чем для других проанализированных в настоящей работе переменных: как над океанами, так и над континентами большое число узлов сетки вынужденно исключены из рассмотрения (рис. 4). Например, вертикальный масштаб концентрации сульфатов недостаточно надежно определяется над большинством океанических регионов (кроме ВЗК), а также над большей частью суши. Это, в частности, затрудняет анализ годового хода H_{SO_4} .

В большинстве регионов, где удалось вычислить этот вертикальный масштаб, он превышает 1,8 км. Исключением, однако, является океанический регион вблизи Южной и Юго-Восточной Азии, где H_{SO_4} близок к 1,5 км. Этот регион характеризуется высоким аэрозольным загрязнением. Маловероятно, что выявленный здесь пространственный минимум H_{SO_4} связан с быстрым вымыванием сульфатного аэрозоля муссонными осадками: эти осадки наиболее значимы в летний

период, тогда как указанный пространственный минимум наиболее выражен зимой.

Аналогично для удельной влажности, МСКО $H_{\text{SO}_4} = 0,1-0,3$ км. При этом значения над сушей как правило, находятся в нижней части указанного интервала, а над океаном — в верхней. При глобальном и годовом осреднении $H_{\text{SO}_4}^{(g)} = 2,1 \pm 0,2$ км.

2.2. Связь между толщиной приземного пограничного слоя и вертикальным масштабом для удельной влажности

С использованием функций fldcor и timcor библиотеки CDO (Climate Data Operators, <http://doi.org/10.5281/zenodo.5614769>) проанализированы корреляционные связи между масштабами высоты и их связь с толщиной ППС.

Пространственные корреляции между переменными невысоки (таблица). Исключение составляет отрицательная пространственная корреляция между H_{PBL} и H_{var} , которая соответствует по знаку временной корреляции.

В частности, коэффициенты межгодовой корреляции между вычисленными по среднесезонным данным H_{PBL} и H_{var} оказываются статистически значимы в ряде тропических регионов (рис. 5 (цв. вкладка) и 6). Отметим, что при длине ряда 18 лет в пренебрежении автокорреляцией и в предполо-

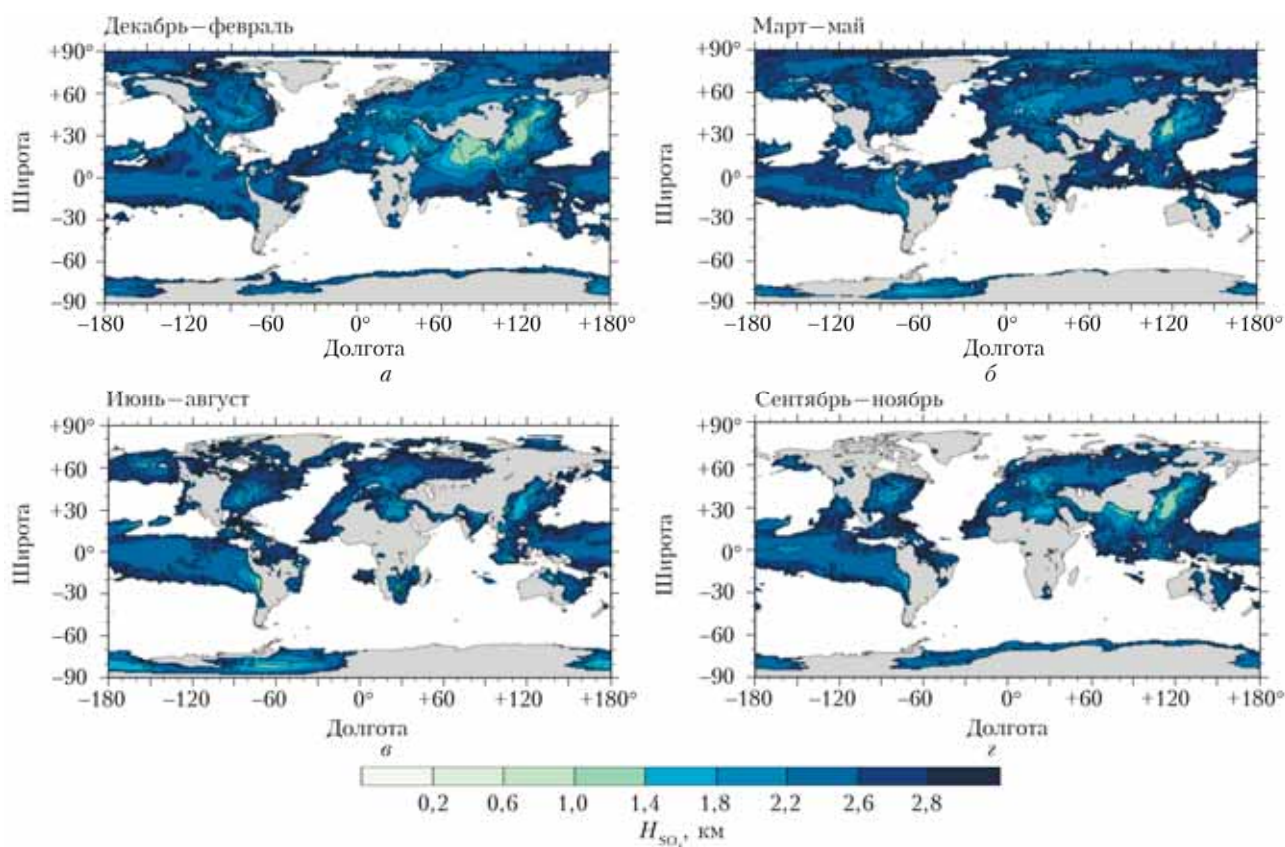


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для вертикального масштаба концентрации сульфатов (цв. рисунок см. на <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.07>)

**Коэффициенты пространственной корреляции
между различными H_Y**

Вертикальный масштаб	H_{PBL}	H_{var}	H_{SO_2}	H_{SO_4}
H_{PBL}	1	-0,59	0,44	0,18
H_{var}		1	-0,16	-0,02
H_{SO_2}			1	0,44
H_{SO_4}				1

Примечание. При вычислении пространственных корреляций значения переменных в ячейках сетки были усреднены с весами, соответствующими площади горизонтальной ячейки данных.

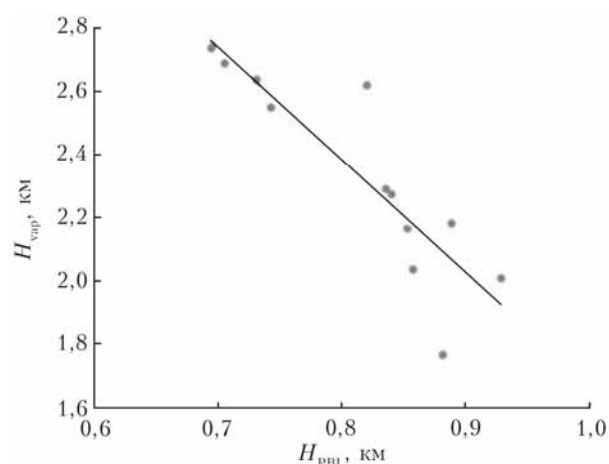


Рис. 6. Корреляционные связи между среднесезонными (декабрь — февраль) значениями H_{var} и H_{PBL} для точки с координатами 0° с.ш., 180° в.д.

жении нормального распределения межгодовых вариаций для всех H_Y пороговые значения коэффициентов корреляции для уровней статистической значимости 90, 95 и 99% составляют 0,400; 0,468 и 0,590 соответственно. Как следствие, изолинии на рис. 5 (и далее на рис. 8) примерно соответствуют границам областей с соответствующим уровнем статистической значимости. Дополнительно отметим, что при этом не требуется применение методов анализа статистической значимости коэффициентов временной корреляции между полями, например теста Уокера или выявления числа ложных срабатываний [26] — по сути, мы просто ищем пространственно когерентные регионы со статистически значимыми связями между отдельными временными рядами (а не полями).

Области значимых отрицательных корреляций между H_{PBL} и H_{var} расположены в регионах с наибольшим влагосодержанием в нижней тропосфере (рис. 7, цв. вставка). Более того, сезонный ход границ этих областей подобен сезонному ходу удельной влажности.

В связи с вышесказанным следует отметить, что высокое влагосодержание ППС способствует развитию влажных конвективных процессов. Влажная конвекция способствует формированию интенсивных осадков, что, в свою очередь, увеличивает

плаваемость конвективных элементов воздуха и дополнительно интенсифицирует развивающуюся конвекцию [27]. Таким образом, отрицательную корреляцию между H_{PBL} и H_{var} во влажных регионах тропиков можно связать с конвективной активностью. С другой стороны, отрицательная корреляция между H_{PBL} и H_{var} в этих регионах может указывать на неприменимость теории Эйнштейна—Стокса для эффективной диффузии в ППС ввиду влияния мезомасштабных вихрей. Кроме того, указанная корреляция практически не проявляется над сушей (см. рис. 5). Небольшие области, где она оказывается значимой, характеризуются сильным влиянием морских воздушных масс, как, например, на востоке Европы зимой (что связано с переносом влаги с океана шторм-треками) или над п-овом Индостан летом (по-видимому, из-за влияния муссонной циркуляции). Следует отметить, что, по крайней мере, вторая область мала по размерам и может быть связана с ложным срабатыванием статистических методов [26].

2.3. Связь между вертикальными масштабами для диоксида серы и сульфатных аэрозолей

В ряде регионов выявляется статистически значимая корреляция между вертикальными масштабами для диоксида серы и для сульфатных аэрозолей (рис. 8, цв. вставка). Она статистически значима, но только в регионах с сильным аэрозольным загрязнением на юге и юго-востоке Евразии, на востоке Северной Америки, и менее значима в Европе. Над континентами Северного полушария это более заметно в теплый период года, чем в холодный.

Относительно низкий уровень статистической значимости корреляции между H_{SO_2} и H_{SO_4} может быть связан, в частности, с недостатками вычисления этих вертикальных масштабов через регрессионные зависимости (см. раздел «Материалы и методы»). Например, над горными регионами данные реанализа могут иметь относительно низкое качество. Над регионами с относительно низким содержанием соединений серы в тропосфере вычисление коэффициентов соответствующей линейной регрессии может быть затруднено ввиду низкой статистической обеспеченности данными. Иначе говоря, интервал значений для таких данных оказывается недостаточно велик и, как следствие, начинают играть роль эффекты «зашумленности», связанной как с неточностью самих данных, так и с процессами, отклоняющими профили $q_{SO_2}(z)$ и $q_{SO_4}(z)$ от выбранной экспоненциальной зависимости.

Тем не менее положительная корреляция между H_{SO_2} и H_{SO_4} проявляется в большинстве регионов с сильным загрязнением атмосферы соединениями серы. В частности, коэффициент наклона α межгодовой линейной регрессии, в которой H_{SO_2} является предиктором, а H_{SO_4} — предиктантом,

положителен во всех таких регионах (рис. 9, цв. вкладка). Более того, его значения достаточны однородны по пространству, изменяются в интервале ~ 1–3. Как следствие, полученная зависимость статистически устойчива.

Заключение

В настоящей работе проведен глобальный анализ географических особенностей вертикальных профилей удельной влажности и концентраций диоксида серы и сульфатных аэрозолей по данным реанализа CAMS для 2003–2020 гг., а также высоты ППС по данным реанализа ERA5 для того же временного интервала. В качестве основной анализируемой характеристики указанных профилей использовался вертикальный масштаб H_Y , который соответствует уменьшению концентрации вещества Y в e раз.

Максимумы высоты верхней границы ППС отмечены в регионах преобладающей циклонической циркуляции — в шторм-треках и в регионах муссонной циркуляции летом. Для вертикального масштаба профиля удельной влажности выявлены минимумы в регионах субтропических круговоротов с преобладающим крупномасштабным опусканием воздушных масс. Вертикальный масштаб профиля концентрации SO_2 характеризуется пространственными минимумами, связанными, по-видимому, с окислением этого вещества. Для H_{SO_4} выявлен пространственный минимум над океаном вблизи Юго-Восточной Азии.

Выявлена статистически значимая отрицательная корреляция между толщиной ППС и вертикальным масштабом для удельной влажности во влажных регионах тропиков. Эта связь может указывать на неприменимость теории Эйнштейна–Стокса для эффективной диффузии в ППС ввиду влияния на нее мезомасштабных вихрей.

Следует отметить, что, несмотря на общепринятые предположения, используемые при выводе формул (3) и (4), отрицательная корреляция между H_{PBL} и H_{var} кажется противоречащей интуитивным представлениям: более высокий ППС связан, как правило, с интенсивной конвекцией в нем, которая, казалось бы, должна способствовать и распространению атмосферных примесей до больших высот. Однако такая интенсивная конвекция обычно сопровождается выпадением интенсивных осадков. Как видно из (3), (4), влияние диффузии на H_{PBL} и H_{var} противоположно по знаку. Физически это связано с тем, что направление диффузионного потока определяется градиентом средней концентрации переносимой переменной. Ввиду того, что скорость ветра в ППС увеличивается с высотой, а концентрация примесей, источником которых является поверхность Земли, уменьшается, диффузионные потоки количества движения и такой примеси направлены в противоположные стороны.

Выявлена также положительная корреляция между вертикальными масштабами профилей концентраций диоксида серы и сульфатов, наиболее

значимо проявляющаяся в регионах сильного загрязнения нижней тропосферы этими веществами. В южной и юго-восточной Евразии эта корреляция (по крайней мере, частично) может быть связана с сезонным максимумом H_{BL} . Однако она проявляется и в других регионах с загрязнением нижней тропосферы соединениями серы — в Европе и на востоке Северной Америки. Как следствие, на ее возникновение влияют механизмы, не связанные напрямую с сезонным максимумом толщины ППС.

Следует отметить, что при других предположениях о, например, вертикальной структуре параметров задачи можно получить и альтернативные соотношения для вертикальных профилей примесей в нижней тропосфере. В частности, в [28] показано, что при линейной зависимости коэффициента диффузии в ППС от высоты вида

$$K_{z,Y} = \lambda_{z,Y,0} (z + z_0), \quad (5)$$

где коэффициент $\lambda_{z,0}$ равен произведению скорости трения и постоянной Кармана; z_0 — высота шероховатости, вертикальный профиль концентрации примеси Y имеет вид

$$q_Y(z) = q_Y(0) (z/z_0 + 1)^{-S_Y}, \quad (6)$$

где $S_Y = u_{T,Y}/\lambda_{z,Y,0}$. Величину $H_Y = HS_Y$ также можно считать характеристикой вертикального масштаба распределения примеси в нижней тропосфере. Однако в таком случае при переходе от соотношения для приземной концентрации вещества к соотношению для его полного содержания в столбе тропосферы интегрирование следует проводить до некоторой высоты dH_Y , где d — число в интервале от 1 до 10 (зависящее от S_Y) с дополнительным условием $0 < S_Y < 1$. При выполнении более жесткого условия $S_Y \ll 1$

$$B_Y = q_Y(0)z_0 dH_Y. \quad (7)$$

Как следствие, во-первых, H_Y оказывается определен неоднозначно (ввиду зависимости от d), во-вторых, требуются знания о типе подстилающей поверхности (значении параметра z_0). По этой причине такой подход не используется в настоящей работе.

Полученные результаты полезны как для компактного представления географических особенностей вертикального распределения примесей в нижней тропосфере, так и с точки зрения численного моделирования климатообразующих процессов в атмосфере в случае задания таких вертикальных распределений в виде универсальных (экспоненциальных) зависимостей от вертикальной координаты в упрощенных моделях Земной системы. В частности, соотношение между H_{SO_2} и H_{SO_4} можно использовать при дальнейшем развитии схемы ChAP [4].

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность И.И. Мохову и О.Г. Чхетиани за полезные обсуждения и анонимному рецензенту за замечания к предыдущей версии статьи.

Финансирование. Статистический анализ параметров связи вертикального распределения атмосферных примесей с толщиной планетарного пограничного слоя и между собой выполнен при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-62-46056). Анализ пространственного распределения толщины планетарного пограничного слоя и параметров вертикального распределения атмосферных примесей выполнен при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-17-00240).

Список литературы

1. Jaenicke R. Tropospheric aerosols // Aerosol–Cloud–Climate Interactions. San Diego: Academic Press, 1993. V. 54. P. 1–31.
2. Warneck P. Chemistry of the Natural Atmosphere. San Diego: Academic Press, 2000. 927 p.
3. Wypych A., Bochenek B. Vertical structure of moisture content over Europe // Adv. Meteorol. 2018. V. 2018. P. 3940503. DOI: 10.1155/2018/3940503.
4. Eliseev A.V., Gizatullin R.D., Timazhev A.V. ChAP 1.0: A stationary tropospheric sulfur cycle for Earth system models of intermediate complexity // Geosci. Mod. Develop. 2021. V. 14, N 12. P. 7725–7747. DOI: 10.5194/gmd-14-7725-2021.
5. Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Semenov V.A. The IAP RAS global climate model. Moscow: Dialogue-MSU. 1998. 110 p.
6. Petoukhov V., Ganopolski A., Brovkin V., Claussen M., Eliseev A., Kubatzki K., Rahmstorf S. CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate // Clim. Dyn. 2000. V. 16, N 1. P. 1–17.
7. Claussen M., Mysak L.A., Weaver A.J., Crucifix M., Fichetef T., Loutre M.-F., Weber S.L., Alcamo J., Alexeev V.A., Berger A., Calov R., Ganopolski A., Goosse H., Lohmann G., Lunkeit F., Mokhov I.I., Petoukhov V., Stone P., Wang Z. Earth system models of intermediate complexity: Closing the gap in the spectrum of climate system models // Clim. Dyn. 2002. V. 18, N 4. P. 579–586. DOI: 10.1007/s00382-001-0200-1.
8. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тихонов В.А., Чернокульский А.В. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 2. С. 243–247.
9. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490, № 1. С. 27–32. DOI: 10.31857/S2686739720010065.
10. Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Докл. РАН. 2012. Т. 443, № 6. С. 732–736.
11. MacDougall A.H., Frölicher T.L., Jones C.D., Rogelj J., Matthews H.D., Zickfeld K., Arora V.K., Barrett N.J., Brovkin V., Burger F.A., Eby M., Eliseev A.V., Hajima T., Holden P.B., Jeltsch-Thömmes A., Koven C., Mengis N., Menviel L., Michou M., Mokhov I.I., Oka A., Schwinger J., Séférian R., Shaffer G., Sokolov A., Tachiiri K., Tjiputra J., Wiltshire A., Ziehn T. Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂ // Biogeosciences. 2020. V. 17, N 11. P. 2987–3016. DOI: 10.5194/bg-17-2987-2020.
12. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. San Diego: Academic Press, 2004. 535 p.
13. Гирифельд Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 929 с.
14. Елисеев А.В., Чжан М., Гизатуллин Р.Д., Алтухова А.В., Переведенцев Ю.П., Скороход А.И. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 41–53.
15. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Спектр, 1996. 272 с.
16. Фейгельсон Е.М. Лучистый теплообмен и облака. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 230 с.
17. Charlson R., Schwartz S., Hales J., Cess R., Coackley J., Hansen J., Hofmann D. Climate forcing by anthropogenic aerosols // Science. 1992. V. 255. P. 423–430. DOI: 10.1126/science.255.5043.423.
18. Naik V., Szopa S., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W.D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., Zanis P. Short-lived climate forcers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021 (в печати).
19. Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. Сравнение антропогенных изменений приземных концентраций О₃, SO₂, CO₂ в Европе по экологическому критерию // Докл. РАН. 1998. Т. 361, № 2. С. 275–279.
20. Eliseev A.V. Impact of tropospheric sulphate aerosols on the terrestrial carbon cycle // Glob. Planet. Change. 2015. V. 124. P. 30–40.
21. Елисеев А.В. Влияние соединений серы в тропосфере на наземный углеродный цикл // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 6. С. 673–683.
22. Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J., Engelen R., Eskes H., Flemming J., Huijnen V., Jones L., Kipling Z., Massart S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schulz M., Suttie M. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 6. P. 3515–3556. DOI: 10.5194/acp-19-3515-2019.
23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biava G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hylm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // Quant. J. Roy. Meteorol. Soc. 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
24. Vogelesang D.H.P., Holtslag A.A.M. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations // Bound.-Lay. Meteorol. 1996. V. 81, N 3. P. 245–269. DOI: 10.1007/BF02430331.
25. Coumou D., Petoukhov V., Eliseev A.V. Three-dimensional parameterizations of the synoptic scale kinetic energy and momentum flux in the Earth's atmosphere // Nonlin. Proc. Geophys. 2011. V. 18, N 6. P. 807–827.
26. Wilks D.S. “Field Significance” and the “False Discovery Rate” // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2006. V. 45, N 9. P. 1181–1189. DOI: 10.1175/JAM2404.1.

27. *Grabowski W.W., Morrison H.* Supersaturation, buoyancy, and deep convection dynamics // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 18. P. 13997–14018. DOI: 10.5194/acp-21-13997-2021.
28. *Taylor P.A.* Constant flux layers with gravitational settling: Links to aerosols, fog and deposition velocities // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 24. P. 18263–18269. DOI: 10.5194/acp-21-18263-2021.

A.V. Eliseev, A.V. Timazhev, P.L. Jimenez. **Scale heights of water vapor and sulfur species in the lower troposphere.**

A global analysis of geographical features of vertical profiles of specific humidity and concentrations of sulfur dioxide and sulfate aerosols from the CAMS reanalysis data, as well as height of planetary boundary layer (PBL) from the ERA5 reanalysis data for 2003–2020 is carried out. The scale height H_Y is used as a characteristic of the mentioned profiles, which corresponds to the e -fold decrease in the substance Y concentration. The maxima of the height of the upper boundary of the planetary boundary layer are noted in the regions of prevailing cyclonic circulation – in storm tracks and in the regions of monsoon circulation in summer. For the vertical scale of the specific humidity profile, minima are identified in the regions of subtropical circulation with prevailing large-scale sinking of air. The vertical scale of the SO_2 concentration profile is characterized by spatial minima associated with the oxidation of this substance. Finally, for H_{SO_4} a spatial minimum near Southeast Asia is found. A statistically significant negative correlation between the PBL thickness and the vertical scale of the profile of specific humidity in humid regions of the tropics is revealed. A positive correlation between the vertical scales of the concentrations of sulfur dioxide and sulfates, most significantly manifested in the regions of strong pollution of the lower troposphere by these substances, is also obtained.

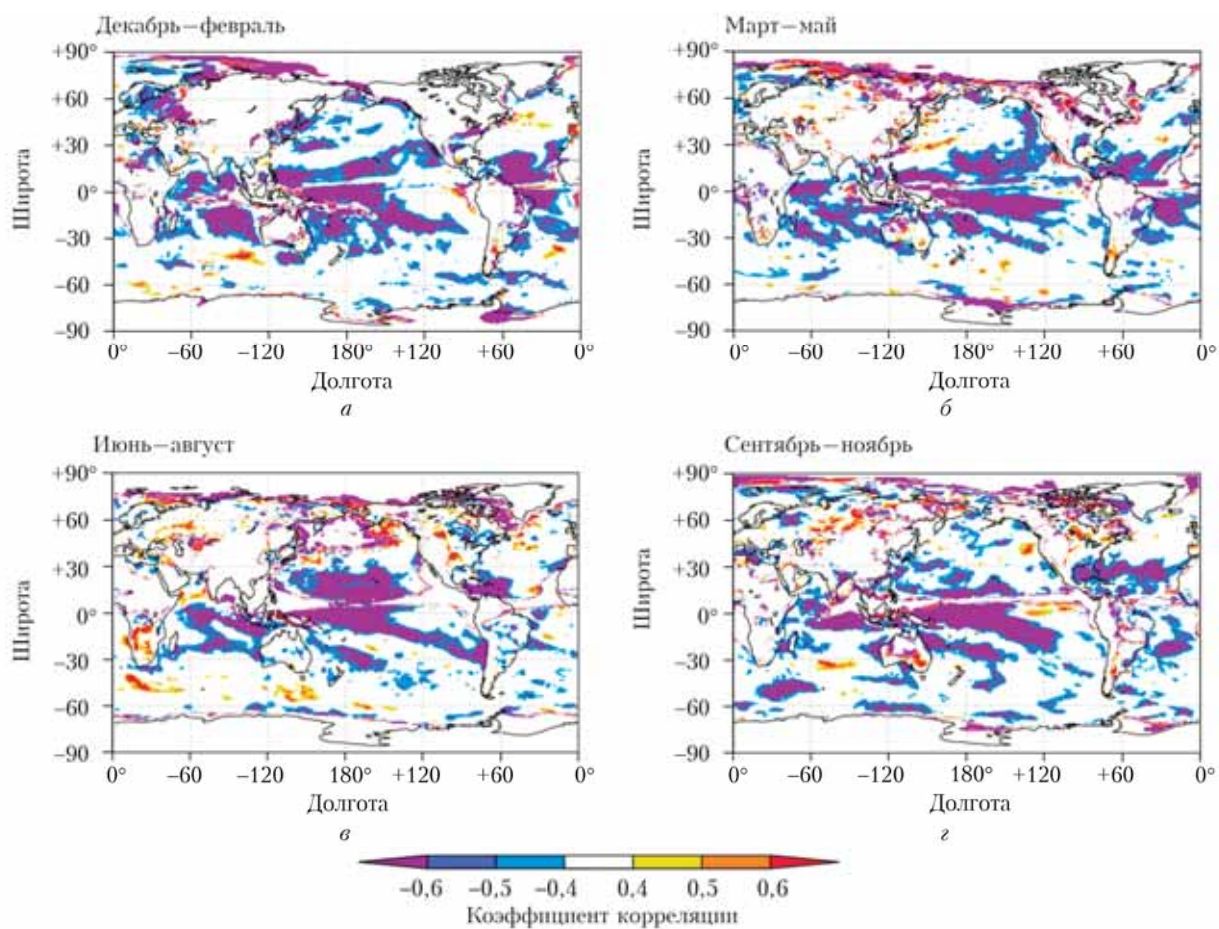


Рис. 5. Карты коэффициентов корреляций между среднесезонными значениями H_{var} и H_{BL} для зимы (а), весны (б), лета (в) и осени (г)

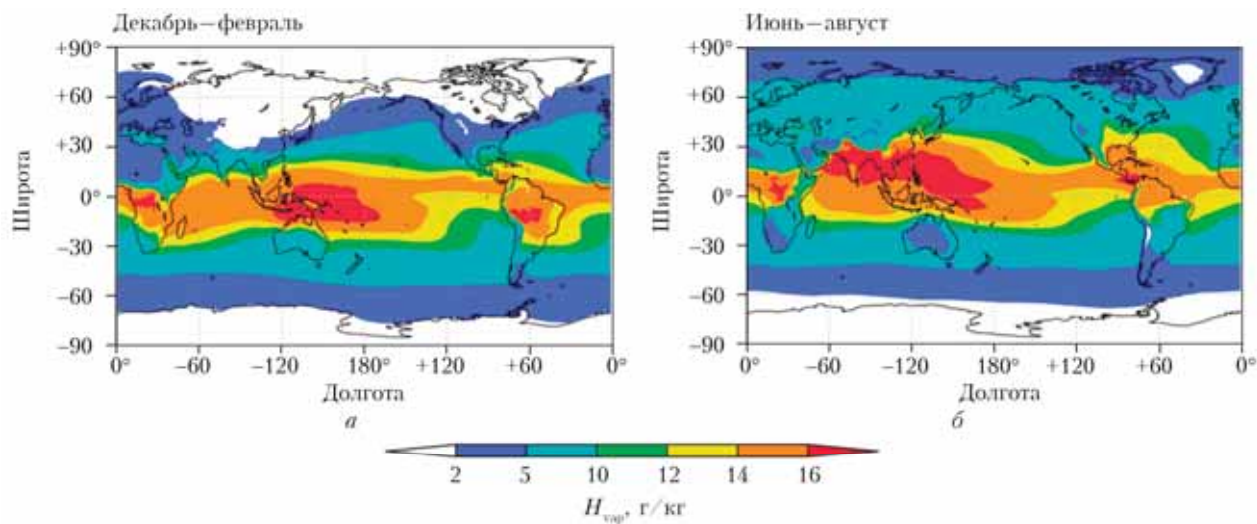


Рис. 7. Среднесезонные значения удельной влажности зимой (а) и летом (б) на изобарическом уровне 950 гПа по данным реанализа ERA5

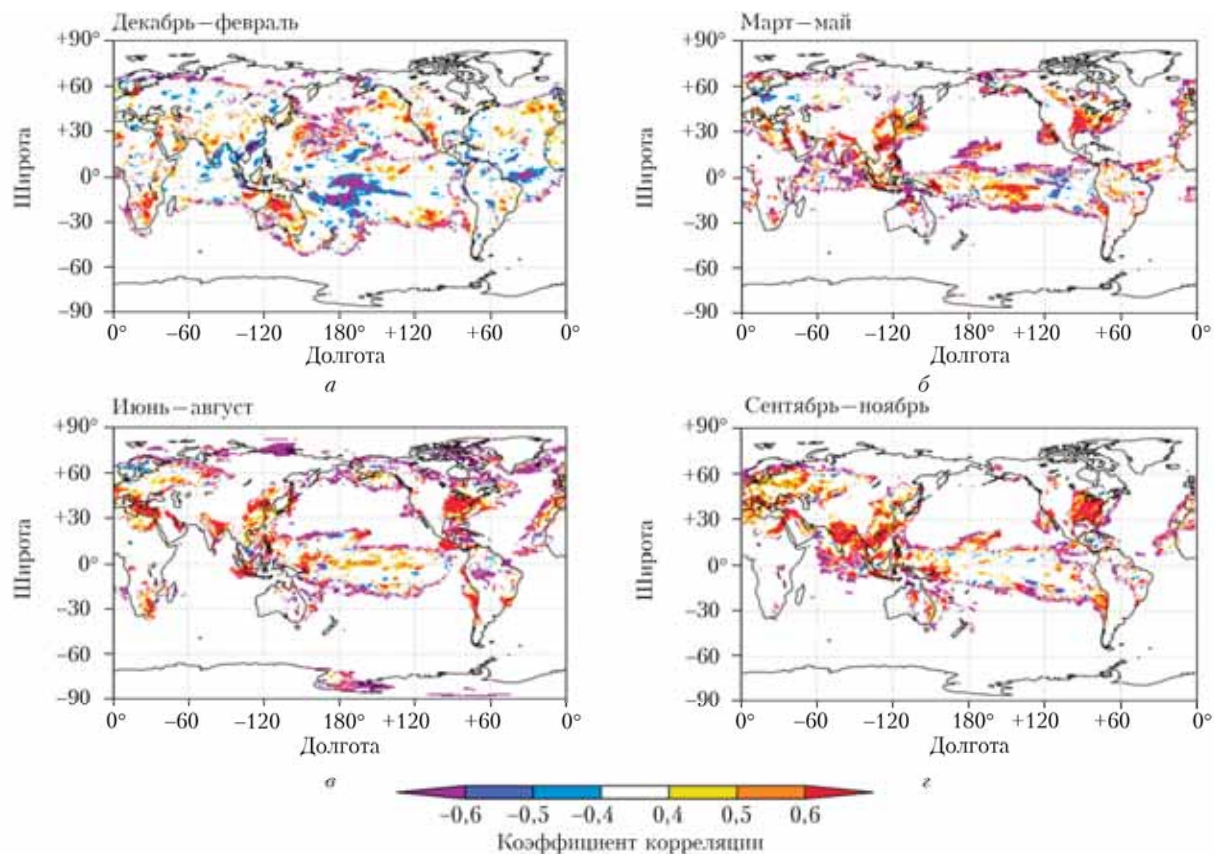


Рис. 8. Коэффициенты корреляции между H_{SO_2} и H_{SO_4} для зимы (а), весны (б), лета (в) и осени (г) Северного полушария

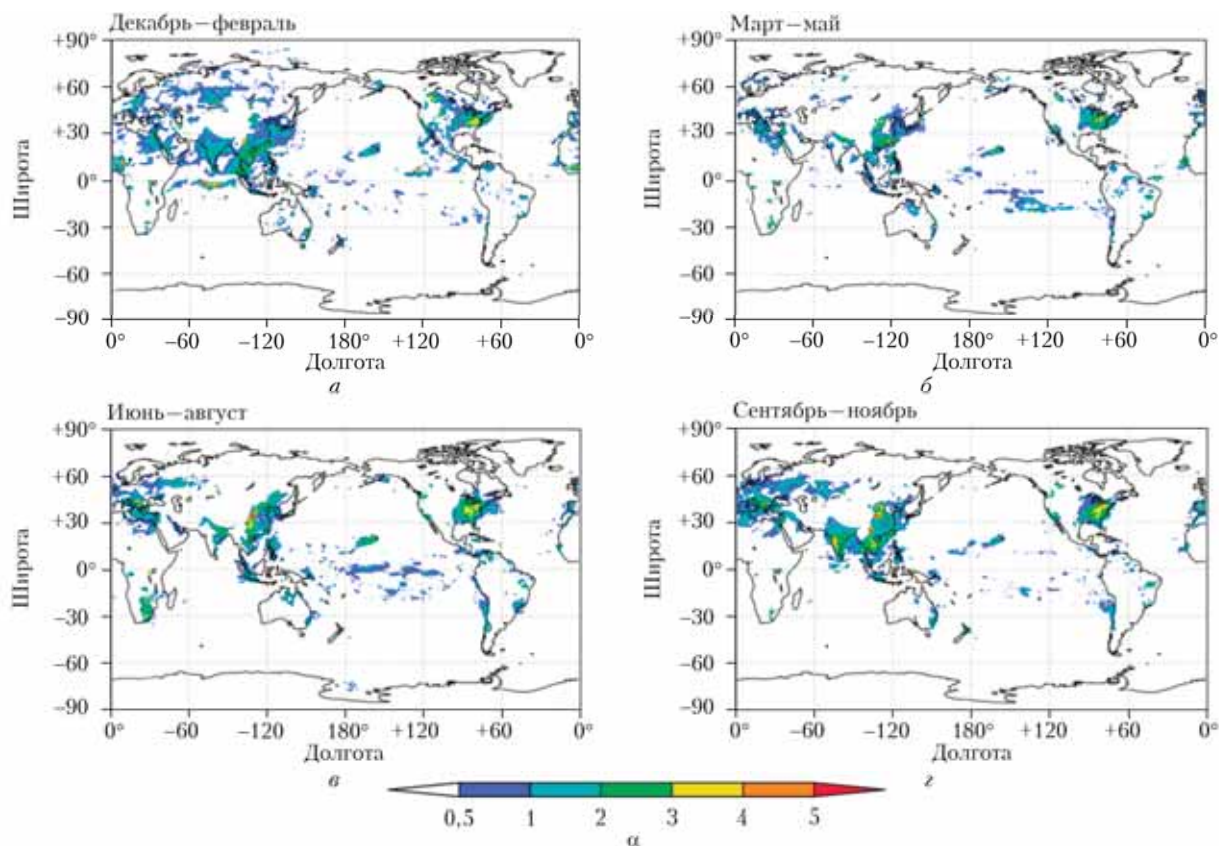


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, но для коэффициента α межгодовой линейной регрессии H_{SO_4} на H_{SO_2} для зимы (а), весны (б), лета (в) и осени (г)