

Влияние структуры воздушных движений на характеристики турбулентности и содержание диоксида серы в атмосфере над ст. «Листвянка»

М.Ю. Шиховцев^{✉1}, А.Ю. Шиховцев², П.Г. Ковадло²,
В.А. Оболкин¹, Е.В. Моложникова^{1*}

¹ Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, Улан-Баторская, 3

² Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, Лермонтова, 126а

Поступила в редакцию 15.08.2024;
после доработки 04.09.2024;
принята к печати 05.09.2024

На сегодняшний день вопрос связи концентрации диоксида серы (SO_2) с мелкомасштабной турбулентностью в пределах Южного Байкала почти не изучен. В настоящей работе приводятся результаты исследования струйных течений и атмосферной турбулентности, влияющих на приземное содержание SO_2 над ст. «Листвянка». Рассматриваются случаи, когда приземная концентрация SO_2 имеет тенденцию к увеличению при отрицательных вертикальных турбулентных удельных потоках тепла. Это происходит на фоне формирования струйных течений в пределах нижнего слоя атмосферы и больших вертикальных сдвигов скорости ветра ниже высоты формирования струи. Вертикальный турбулентный удельный поток тепла в приземном слое атмосферы может служить ключевым индикатором, определяющим возможность положительной связи между приземной концентрацией SO_2 и полной кинетической энергией турбулентности. В результате анализа выявлено, что концентрация SO_2 имеет тенденцию к увеличению при отрицательных вертикальных турбулентных потоках температуры на фоне развития струйных течений низкого уровня. В аналогичных ситуациях, но при положительных или близких к нулю значениях потоков температуры концентрации SO_2 , как правило, остаются на уровне фоновых значений. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения влияния атмосферных струйных течений, формируемых вблизи земной поверхности, и турбулентности на содержание примесей в приземном слое атмосферы, а также при разработке прогностических моделей.

Ключевые слова: атмосфера, атмосферный аэрозоль, турбулентность, кинетическая энергия турбулентности, Южное Прибайкалье; atmosphere, atmospheric aerosol, turbulence, kinetic energy of turbulence, Southern Baikal region.

Введение

Диоксид серы (SO_2) относится к основным загрязнителям атмосферы. Этот газ играет ключевую роль в формировании сульфатных аэрозолей, способствует образованию кислотных дождей и влияет на погоду и климат [1, 2]. Выявление особенностей вариаций фоновых концентраций и аномалий содержания SO_2 в различных слоях атмосферы, а также корректное воспроизведение его динамики атмосферными моделями являются одной из актуальных задач мировой науки. Совершенствование атмосфер-

ных моделей для диагностики и прогнозирования содержания атмосферных примесей, включая региональные оценки концентраций SO_2 ($n(\text{SO}_2)$), основывается, в том числе, на развитии представлений об изменчивости атмосферных течений и турбулентности [3, 4].

Анализ ранее выполненных исследований указывает на сложную динамику SO_2 в турбулентном воздушном потоке. В частности, в работе [5] изучается содержание газовых примесей, в том числе SO_2 , на концентрацию которого в значительной степени воздействует бризовая циркуляция на юго-восточном берегу Байкала. На особую роль метеорологических условий и динамических процессов в формировании полей повышенных концентраций SO_2 в Южном Байкале указывается также в работе [6]. В ней показано, что примеси от предприятий, расположенных в долине р. Ангары, могут распро-

* Максим Юрьевич Шиховцев (max97irk@yandex.ru);
Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru);
Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru);
Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ru);
Елена Владимировна Моложникова (yelka75@yandex.ru).

страняться в атмосфере в виде узкой полосы в условиях слабой атмосферной турбулентности и обуславливать локальные пики приземных концентраций SO_2 . Содержание в атмосфере соединений серы во многом определяется и крупномасштабными метеорологическими полями. В частности, при антициклональной крупномасштабной завихренности атмосферных течений, ассоциируемой с ясной или малооблачной погодой, значимый вклад в загрязнение воздуха в пределах Южного Байкала вносят предприятия иркутского промышленного комплекса [7].

Если воздействие крупномасштабных атмосферных процессов на содержание малых газовых составляющих (включая SO_2) в целом хорошо изучено, то вопрос связей между $n(\text{SO}_2)$ и мелкомасштабной турбулентностью в пределах Южного Байкала рассмотрен слабо. Это связано с тем, что корреляционная связь между вариациями $n(\text{SO}_2)$ и интенсивностью мелкомасштабной турбулентности на разных временных и пространственных масштабах является неустойчивой как по величине, так и по знаку. Иными словами, мелкомасштабная турбулентность, генерируемая в пределах нижней части пограничного слоя атмосферы большой вертикальной мощности, должна приводить к диффузии и уменьшению приземных концентраций SO_2 . И напротив, в тонком приповерхностном слое атмосферы при наличии мезомасштабного струйного течения формирование областей турбулентности может быть обусловлено разрушением струи по ее периферии; разрушение мезомасштабного струйного течения при определенной его пространственной ориентации относительно источников загрязнений может сопровождаться ростом приземных концентраций SO_2 .

В настоящем исследовании мезомасштабное струйное течение определяется по локальному пику в вертикальном профиле скорости ветра в пределах нижнего (до 1,5 км) атмосферного слоя, существующему как минимум один час. Этот временной масштаб условен, определяется временным разрешением данных реанализа и может быть скорректирован в зависимости от начальных и граничных условий рассматриваемой задачи. При анализе вертикального профиля скорости ветра мезомасштабное струйное течение выделялось по абсолютному порогу уменьшения скорости ветра выше и ниже ядра (максимума) струйного течения. За такой порог условно принималось значение, равное 1 м/с. Для установления факта, что данный пик относительно некоторых характерных изменений вертикального профиля скорости может быть связан со струйным характером атмосферных движений, локальный вертикальный сдвиг скорости ветра по абсолютной величине был принят больше 0,01 1/с.

Как правило, в атмосферном пограничном слое области усиленного сдвига скорости ветра и развитой мелкомасштабной турбулентности формируются под осью струйного течения. Эти области ассоции-

руются с генерацией турбулентных флуктуаций как скорости ветра, так и температуры воздуха, а также с увеличением кинетической энергии турбулентности в нижележащих слоях атмосферы [8, 9]. Как показали данные лидарных измерений, в пределах нижнего километрового слоя над ст. «Листвянка» формируются мезомасштабные струйные течения. Характерные высоты формирования струй составляют 200–250 м [10, 11] и 600–800 м [12, 13].

Цель настоящего исследования — оценить влияние атмосферных струйных течений, формируемых вблизи земной поверхности, и турбулентности на содержание SO_2 в приземном слое атмосферы.

Материалы и методы

Приземные концентрации SO_2 измерялись в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории, вблизи п. Листвянка (51,84° с.ш., 104,89° в.д.), с 12.08 по 20.10.2023 г. Станция расположена на вершине прибрежного холма на высоте 205 м над урезом озера (656 м н.у.м.) в 350 м от побережья. Измерения проводились хеминोलюминесцентным газоанализатором CB-320 (ОПТЭК, Санкт-Петербург, Россия) с разрешением 0,001 мг/м³. Приведенная погрешность измерений в диапазоне от 0 до 0,05 мг/м³ составляет $\pm 25\%$. Относительная погрешность в диапазоне от 0,05 до 2,0 мг/м³ также равна $\pm 25\%$. Время усреднения $n(\text{SO}_2)$ составило 10 мин.

Для определения вертикальных профилей метеорологических характеристик мы использовали ежечасные данные реанализа ERA5 на стандартных изобарических поверхностях. Эти ряды являются ассимилированным глобально согласованным набором данных на основе спутниковых наблюдений, результатов измерений метеорологических метеостанций и станций радиозондирования атмосферы в сочетании с погодными моделями.

Переход от уровней давления к высотам выполнялся в приближении модели стандартной атмосферы. На основе данных реанализа ERA5 были определены вертикальные профили температуры воздуха T и горизонтальной составляющей скорости ветра V , оценены средние сдвиги горизонтальной составляющей скорости ветра $\langle dV/dz \rangle$ (треугольные скобки здесь и далее обозначают операцию усреднения по временным реализациям), а также величина завихренности атмосферных течений $\Omega = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ (u и v — составляющие скорости ветра по осям x и y соответственно).

В пределах рассматриваемого региона траектории движения воздушных масс были построены с использованием гибридной лагранжевой модели HYSPLIT [14]. Расчеты проведены на основе архивных метеорологических данных GFS (Global Forecast System) с сеткой значений 0,25° на момент повышения концентраций SO_2 . Отметим, что в рамках модели HYSPLIT имеется возможность различным

образом воспроизводить траектории воздушных частиц. В частности, возможно моделировать на изобарических, изопикнических и изоэнтропических уровнях, а также в поле вертикальной скорости и сигма-системе координат

$$\sigma = P/P_s,$$

где P — атмосферное давление; P_s — приземное атмосферное давление.

Несмотря на то что изоэнтропический подход в определенной степени повышает точность воспроизведения крупномасштабных траекторий, в настоящей статье использовали поле вертикальной скорости. Это связано с тем, что в областях нейтральной стратификации и сверхадиабатических градиентов температуры изэнтропические поверхности плохо определяются ввиду их многозначности по отношению к поверхностям атмосферного давления. Кроме того вблизи земли изэнтропические поверхности часто пересекают землю под большими углами, что требует аккуратного анализа изменений их формы в этой области. В частности, рассматривая различные воздушные массы в трехмерных координатах, можно отметить, что изэнтропические поверхности имеют достаточно сложную форму, с «углублениями» в области теплого воздуха и «возвышениями» в области холодного. Поэтому изэнтропические поверхности существенно изменяются не только от сезона к сезону, но и в течение отдельного естественно-синоптического периода, а также суток.

Помимо полуэмпирических ассимилированных данных реанализа ERA5 для анализа структуры приземной турбулентности использовались приземные данные мачтовых измерений акустической метеосистемы «Метео-2» (г. Томск, Россия). Частота записи метеорологических характеристик составила 10 Гц. В результате обработки «мгновенных» значений температуры и скорости ветра получены усредненные за 10-минутные интервалы статистические оценки удельной кинетической энергии турбулентности и вертикального турбулентного потока температуры. Кинетическая энергия турбулентности определялась по формуле

$$E_k = \langle (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)/2 \rangle,$$

где $\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2$ — дисперсии составляющих скорости ветра u , v и w .

Вертикальный турбулентный поток температуры, определяющий величину неупорядоченного перемещения объемов воздуха через некоторую единичную площадку в направлении нормалей, определялся на высоте 30 м над подстилающей поверхностью на основе соотношения

$$Q_T = \langle w' \cdot T' \rangle,$$

где w' — турбулентные флуктуации вертикальной составляющей скорости ветра; T' — турбулентные флуктуации температуры воздуха.

Результаты и обсуждение

Вертикальные профили скорости ветра над ст. «Листвянка» по данным реанализа ERA5

До настоящего времени отсутствуют детальные исследования структуры атмосферных движений с высоким временным и вертикальным разрешением над ст. «Листвянка», которые основывались бы на данных синхронных измерений вертикальных профилей скорости ветра, оптических и турбулентных атмосферных характеристик, а также концентраций атмосферных примесей. Исследования, включающие в себя лазерное зондирование атмосферы и анализ турбулентных характеристик, в основном проводились в ходе корабельных экспедиций [15, 16] либо на юго-восточном берегу оз. Байкал на территории ст. «Боярский» [17–19]. С целью определения вертикальных профилей скорости ветра над ст. «Листвянка» мы использовали ежедневные данные реанализа ERA5, обладающего сравнительно высоким пространственным разрешением: по горизонтали — порядка 30 км, по вертикали — 25 гПа, что соответствует 137 изобарическим уровням [20, 21]. На рис. 1 показаны вертикальные профили скорости ветра за сутки 21 и 22.08.2023 г.

Для минимизации влияния термических инверсий на результаты расчетов были выбраны атмосферные ситуации, близкие к безразличной термической стратификации (рис. 2). В условиях ясной и малооблачной погоды при безразличной стратификации атмосферы вертикальные профили турбулентности во многом определяются ее приземной интенсивностью и можно предполагать степенной характер уменьшения интенсивности турбулентности с высотой в нижнем слое атмосферы 100–200 м без существенной вероятности возникновения тонких турбулентных слоев. Анализ вертикальных профилей температуры воздуха указывает на ее уменьшение с высотой над подстилающей поверхностью в дневное время. В ночное время также наблюдались слабое термическое выхолаживание нижних атмосферных слоев и отсутствие термических инверсий.

Структура воздушных течений над ст. «Листвянка» сложна. В вертикальных профилях скорости ветра выделяются пики, соответствующие положениям струйных мезомасштабных течений. Примечательно, что по данным реанализа ERA5 в августе 2023 г. существовали струйные течения с 03:00 до 08:00 на высотах 400–700 м. Это в достаточной степени согласуется с телескопическими и лидарными исследованиями, проводимыми ранее летом [22–24].

В рамках настоящего исследования выполнен анализ характеристик струйных течений, атмосферной завихренности в области под струйными течениями и приземной концентрации SO_2 . Однозначной связи между интенсивностью воздушного потока на оси струи и концентрацией SO_2 фактически

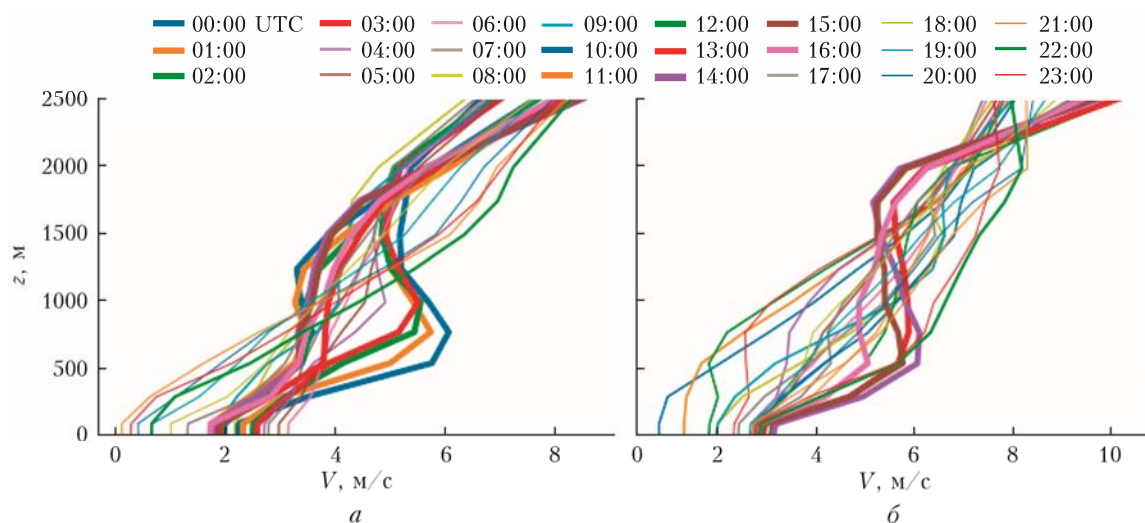


Рис. 1. Вертикальные профили скорости ветра над ст. «Листвянка»: 21.08.2023 г. (а); 22.08.2023 г. (б) (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.11>)

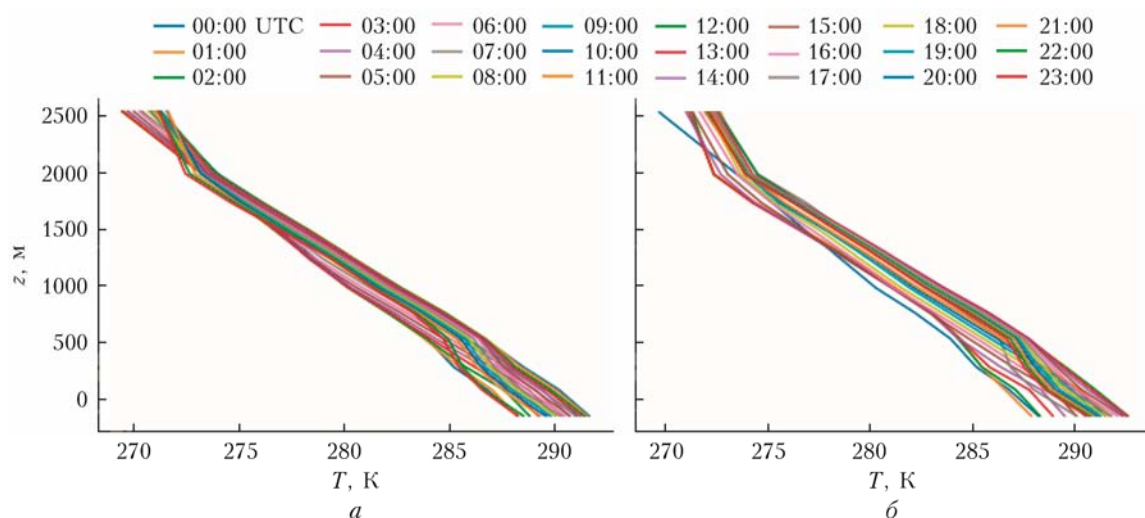


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воздуха над ст. «Листвянка»: 21.08.2023 г. ($-0,72 \text{ K}/100 \text{ м}$) (а); 22.08.2023 г. ($-0,65 \text{ K}/100 \text{ м}$) (б)

не наблюдается. Как мы покажем ниже, концентрация SO_2 в приземном слое больше связана с состоянием турбулентности под струйным течением в периоды преобладания отрицательных вертикальных турбулентных потоков температуры воздуха.

Сопоставление изменений концентраций SO_2 , приземной турбулентности и атмосферной завихренности под струйным течением

Для сопоставления временных изменений концентраций диоксида серы с другими атмосферными характеристиками на рис. 3, а и 4, а приведены суточные вариации концентрации SO_2 , полной кинетической энергии турбулентности и вертикальных турбулентных потоков температуры воздуха 21 и 22.08.2023 г. соответственно. Анализ рис. 3, а и 4, а показывает, что, на первый взгляд, зависимость концентрации SO_2 от атмосферной турбулентности

отсутствует. Тем не менее в атмосфере часто наблюдаются ситуации, когда такую связь можно установить.

Проведенный анализ поля ветра (рис. 3, б и 4, б) указывает на то, что в обоих случаях повышения концентраций SO_2 связаны с привнесением в атмосферу ст. «Листвянка» воздушных масс, оказавшихся под влиянием источников Иркутской агломерации. Анализируя рис. 3, можно предположить, что 21.08 воздушные массы сформировались над промышленными районами Иркутской области и, попав в котловину Южного Байкала, были принесены на станцию. Поэтому, несмотря на район формирования воздушных масс, максимум концентрации оксидов серы (рис. 3, а) был зафиксирован при слабых ветрах юго-западного направления, а полная кинетическая энергия турбулентности была близка к нулю.

Согласно рис. 4, б 22.08 на станции преобладал ветер в секторе $295\text{--}340^\circ$, что соответствует

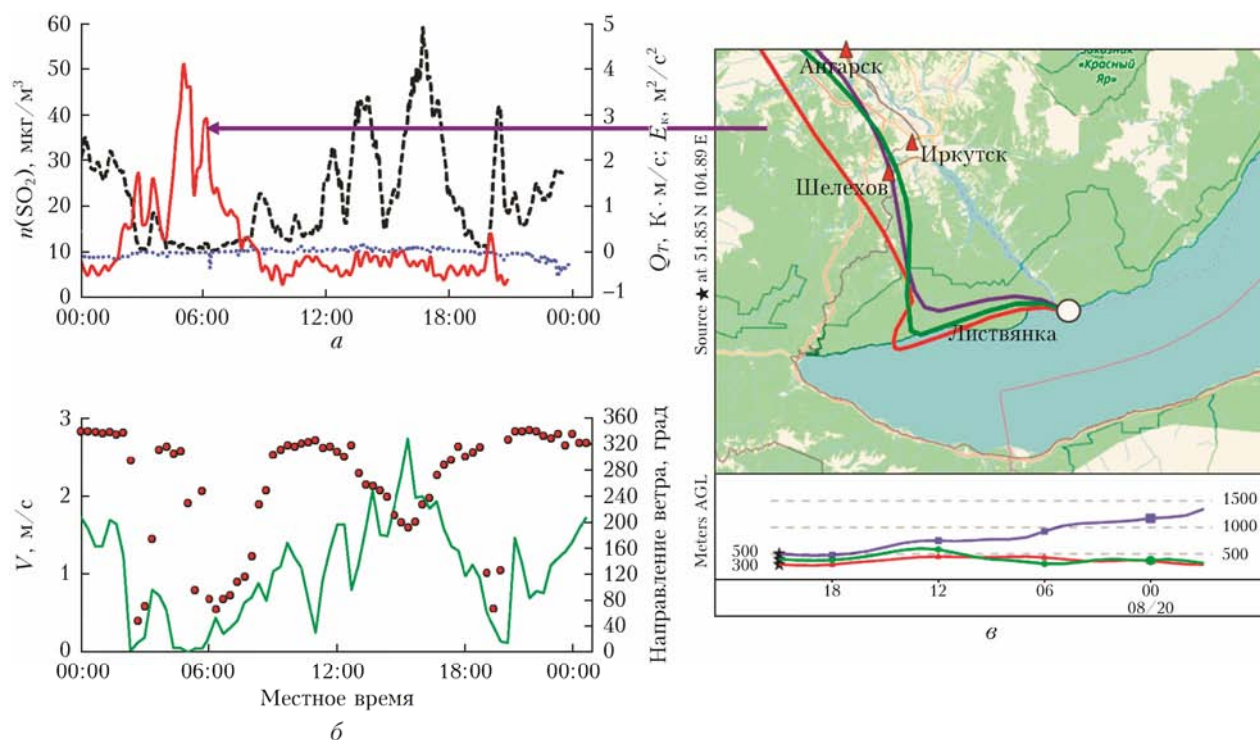


Рис. 3. Суточный ход: концентрации SO_2 (красная линия) и кинетической энергии турбулентности (черная линия) при положительных и близких к нулю Q_T (синяя линия) (а), приземной скорости (зеленая линия) и направления ветра (красные кружки) (б) 21.08.2023 г.; обратная траектория движения воздушных масс к 05:00 по местному времени (в)

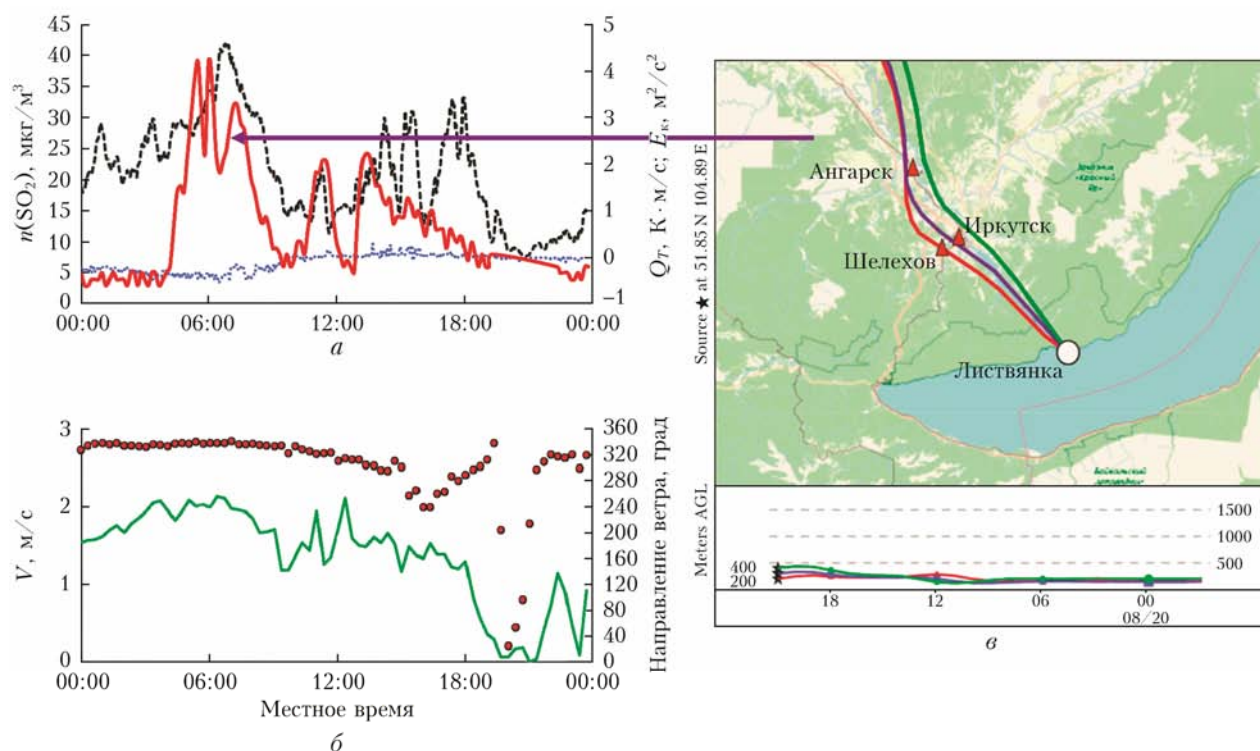


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для 22.08.2023 г.

прямому направлению «Иркутск—Листвянка». Максимум концентрации SO_2 зарегистрирован при отрицательных вертикальных потоках тепла (рис. 4, а).

Физическое объяснение связи временных изменений приземной концентрации SO_2 и характе-

ристик турбулентности может состоять в следующем. Приземная концентрация SO_2 в воздушном бассейне ст. «Листвянка» определяется сезонностью (объемом выбросов от антропогенных источников), направлением переноса воздушных масс [25] и ин-

тенсивностью атмосферной турбулентности в нижних слоях атмосферы. В свою очередь, интенсивность турбулентности зависит от характеристик атмосферы непосредственно под мезомасштабными струйными течениями, наблюдающимися на разных высотах в нижнем 0,2–2,5-километровом слое атмосферы [26]. Это обстоятельство согласуется с результатами, полученными в работе [27]. В частности, наш интерес к мезомасштабным струйным течениям над ст. «Листвянка» обусловлен тем, что они могут активизировать процесс переноса загрязняющих веществ от высотных антропогенных источников в удаленные районы в «слаборассеянном» виде [28–30]. Отметим, что согласно расчетам четкой связи между скоростью потока на оси струи и $n(\text{SO}_2)$ не удалось установить. В большей степени приземная концентрация SO_2 определяется развитостью турбулентности в нижнем слое атмосферы и, более того, непосредственно под струйным течением на высотах 300–400 м.

Таблица демонстрирует усредненные оценки атмосферных характеристик в двух случаях повышения приземных концентраций SO_2 . На рис. 5 показаны вертикальные профили завихренности атмосферных течений за 22.08.2023 г., когда наблюдалась связь между изменениями $n(\text{SO}_2)$ и E_k на высоте расположения акустической метеостанции «Метео-2». Анализ рис. 5 и таблицы позволяет предположить, что рост интенсивности динамической турбулентности (перемешивания по вертикали) под струей, вероятно, определяет процессы ослабления и разрушения струи, а также «осаждения» SO_2 .

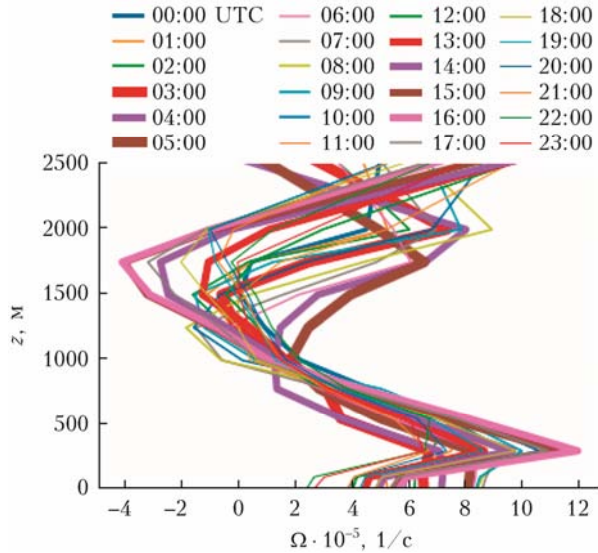


Рис. 5. Вертикальные профили завихренности атмосферных течений над ст. «Листвянка», 22.08.2023 г.

Усредненные оценки атмосферных характеристик на высоте 30 м

Параметр	Значения		
Q_T , $\text{K} \cdot \text{м}/\text{с}$	–0,38	–0,40	0,02
$\langle dV/dz \rangle$, $1/\text{с}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Ω , $1/\text{с}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$
E_k , $\text{м}^2/\text{с}^2$	0,5	4,2	4,0
$n(\text{SO}_2)$, $\text{мкг}/\text{м}^3$	50,0	37,5	9,8

Ввиду сложности организации комплексных измерений в приземном слое и сопровождающих их дистанционных профилометрических измерений требуется найти некоторые потенциальные индикаторы воздействия мезоструйных течений на $n(\text{SO}_2)$. При развитии динамической турбулентности в достаточно мощном атмосферном слое и наличии мезоструй в пределах нижнего ~500-метрового слоя таким индикатором может служить вертикальный турбулентный поток тепла. В частности, в области отрицательных его значений происходит турбулентный перенос объемов воздуха из более холодных верхних атмосферных слоев в более теплые нижние.

Таким образом, вертикальный турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы является ключевым индикатором, определяющим возможность положительной корреляции между $n(\text{SO}_2)$ и E_k . Положительные коэффициенты корреляции (0,6–0,8) между этими величинами наблюдаются при отрицательных вертикальных потоках температуры воздуха, когда турбулентные объемы воздуха движутся от некоторого верхнего более холодного слоя к нижнему. При этом амплитуда нисходящих турбулентных потоков температуры воздуха определяет некоторый характерный масштаб расстояния до атмосферного слоя. С развитием положительных турбулентных потоков температуры линейная связь между $n(\text{SO}_2)$ и E_k теряется. Такой сценарий наблюдается, по крайней мере, на фоне мезомасштабных струйных течений в нижних слоях атмосферы и связанной с ними вихревой составляющей атмосферных течений.

Заключение

В настоящей работе анализируются случаи, когда наблюдалось увеличение приземной концентрации SO_2 , которое, как мы предполагаем, может быть вызвано (или сопровождаться) отрицательными турбулентными потоками температуры в приземном слое атмосферы, формируемыми под воздействием низкоуровневого мезомасштабного струйного течения. В результате анализа типичных атмосферных ситуаций, связанных с появлением пиков средней амплитуды ($30\text{--}50 \text{ мкг}/\text{м}^3$) в концентрации SO_2 , получены следующие выводы.

1. По данным реанализа ERA5 показано, что в атмосфере над оз. Байкал мезомасштабные струйные течения формируются на высотах 400–700 м относительно уреза воды. Непосредственно под струйными течениями на высотах 300–400 м генерируются области с высокой атмосферной завихренностью и, вероятно, интенсивной динамической турбулентностью.

2. При отрицательных вертикальных турбулентных потоках температуры на фоне формирования струйных течений и больших вертикальных сдвигов скорости ветра в нижнем атмосферном слое приземная концентрация SO_2 имеет тенденцию к увеличению. При положительных или близких к нулю вертикальных турбулентных потоках температуры

атмосферная турбулентность приводит к противоположному эффекту: на фоне интенсивного перемешивания воздуха (больших значений E_k) концентрации SO_2 , как правило, остаются на уровне до 10 мкг/м^3 .

Финансирование. Исследование содержания газовых примесей выполнено по теме госзадания ЛИН СО РАН № 0279-2021-0014 «Исследование роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна озера Байкал, идентификация источников загрязнения атмосферы». Изучение особенностей вертикального турбулентного перемешивания выполнено за счет гранта РНФ № 24-72-10043 «Разработка методов диагностики характеристик нижней атмосферы с высоким разрешением в приложении к наземным астрономическим телескопам».

Список литературы

1. Sheng J.X., Weisenstein D.K., Luo B.P., Rozanov E., Stenke A., Anet J., Peter T. Global atmospheric sulfur budget under volcanically quiescent conditions: Aerosol-chemistry-climate model predictions and validation // J. Geophys. Res.: Atmos. 2015. V. 120, N 1. P. 256–276. DOI: 10.1002/2014JD021985.
2. Porter J.G., De Bruyn W., Saltzman E.S. Eddy flux measurements of sulfur dioxide deposition to the sea surface // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 15291–15305. DOI: 10.5194/acp-18-15291-2018.
3. Gordon M., Blanchard D., Jiang T., Makar P.A., Staebler R.M., Aherne J., Zhang X. High sulfur dioxide deposition velocities measured with the flux–gradient technique in a boreal forest in the Alberta Oil Sands Region // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 13. P. 7241–7255. DOI: 10.5194/acp-23-7241-2023.
4. Liu M., Hoffmann L., Griessbach S., Cai Z., Heng Y., Wu X. Improved representation of volcanic sulfur dioxide depletion in Lagrangian transport simulations: A case study with MPTRAC v2.4 // Geosci. Model Develop. 2023. V. 16, N 17. P. 5197–5217. DOI: 10.5194/gmd-16-5197-2023.
5. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Балжанов Т.С. Влияние динамических процессов на вариации озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны озера Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 505–511. DOI: 10.15372/AOO20150602.
6. Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Латышева И.В., Ходжер Т.В. Оценки пространственного распределения малых газовых примесей над акваторией озера Байкал в летний период с помощью полевых измерений и результатов математического моделирования // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2016. Т. 18. С. 69–80.
7. Латышева И.В., Иванова А.С., Макухин В.Л., Мордвинов В.И. Влияние метеорологических условий на процессы распространения и трансформации аэрозольных и газовых компонентов в регионе озера Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 322–324.
8. Duarte H.F., Leclerc M.Y., Zhang G., Durden D., Kurzeja R., Parker M., Werth D. Impact of nocturnal low-level jets on near-surface turbulence kinetic energy // Bound.-Lay. Meteorol. 2015. V. 156, N 3. P. 349–370. DOI: 10.1007/s10546-015-0030-z.
9. Wei W., Zhang H., Cai X., Song Y., Bian Y., Xiao K., Zhang H. Influence of intermittent turbulence on air pollution and its dispersion in winter 2016/2017 over Beijing, China // J. Meteorol. Res. 2020. V. 34, N 1. P. 176–188. DOI: 10.1007/s13351-020-9128-4.
10. Banakh V.A., Sukharev A.A., Falits A.V., Gordeev E.V., Zalzoznaya I.V. Estimation of the Richardson number in the atmospheric boundary layer using data from temperature radiometer and Doppler lidar // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 1575–1580. DOI: 10.1117/12.2575597.
11. Оболкин В.А., Шаманский Ю.В., Ходжер Т.В., Фалиц А.В. Мезомасштабные процессы переноса атмосферных загрязнений в районе Южного Байкала // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 104–113. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).9.
12. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar studies of wind turbulence in the stable atmospheric boundary layer // Remote Sens. 2018. V. 10, N 8. P. 1219–2030. DOI: 10.3390/rs10081219.
13. Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 5. С. 438–446.
14. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories // Australian Meteorol. Mag. 1998. V. 47, N 4. P. 295–308.
15. Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of the atmosphere on the coast of Lake Baikal // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 10. P. 5239–5248. DOI: 10.5194/amt-9-5239-2016.
16. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Шаманов В.С. Лидарные и *in situ* измерения оптических параметров поверхностных слоев воды в озере Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 377–385; Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Penner I.E., Shamanov V.S. Lidar and *in situ* measurements of the optical parameters of water surface layers in Lake Baikal // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 5. P. 478–486. DOI: 10.1134/S1024856011050083.
17. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Балжанов Т.С., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Насонов С.В. Особенности переноса и трансформации аэрозольных и газовых примесей атмосферы в береговой зоне оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 968–973. DOI: 10.15372/AOO20181205; Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydyypov V.V., Balzhanov T.S., Balin Y.S., Penner I.E., Nasonov S.V. Specific features of transport and transformation of atmospheric aerosol and gas admixtures in the coastal zone of Lake Baikal // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 158–164.
18. Nasonov S., Balin Y., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I. Study of atmospheric aerosol in the Baikal mountain basin with shipborne and ground-based lidars // Remote Sens. 2023. V. 15, N 15. P. 3816. DOI: 10.3390/rs15153816.
19. Nasonov S., Balin Y., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I. Peculiarities of the vertical structure of atmospheric aerosol fields in the basin of Lake Baikal according to lidar observations // Atmosphere. 2023. V. 14, N 5. P. 837. DOI: 10.3390/atmos14050837.
20. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Muñoz-Sabater J., Thépaut J. N. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

21. Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O., Wu X., Griessbach S., Wright J.S. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 5. P. 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.
22. Шиховцев А.Ю. Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 1. С. 74–80. DOI: 10.15372/AOO20220111; Shikhovtsev A.Yu. A method of determining optical turbulence characteristics by the line of sight of an astronomical telescope // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 3. P. 303–309.
23. Banakh V., Smalikho I. Lidar study of wind turbulence, low level jet streams, and atmospheric internal waves in the boundary layer of atmosphere // *EPJ Web Conf.* 2018. V. 176, N 06005. DOI: 10.1051/epjconf/201817606005.
24. Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V. Wind–temperature regime and wind turbulence in a stable boundary layer of the atmosphere: Case study // *Remote Sens.* 2020. V. 12, N 6. P. 955. DOI: 10.3390/rs12060955.
25. Шиховцев М.Ю., Оболкин В.А., Ходжер Т.В., Моложникова Е.В. Изменчивость приземной концентрации твердых частиц PM₁–PM₁₀ в воздушном бассейне южного Прибайкалья // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 6. С. 448–454. DOI: 10.15372/AOO20230604; Shikhovtsev M.Yu., Obolkin V.A., Khodzher T.V., Molozhnikova Ye.V. Variability of the ground concentration of particulate matter PM₁–PM₁₀ in the air basin of the Southern Baikal Region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 6. P. 655–662.
26. Shikhovtsev A.Y. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2024. P. 31. DOI: 10.1093/pasj/psae031.
27. Yang B., Finn D., Rich J., Gao Z., Liu H. Effects of low-level jets on near surface turbulence and wind direction changes in the nocturnal boundary layer // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2023. V. 128, N 11. P. E2022JD037657. DOI: 10.1029/2022JD037657.
28. Liu H., He M., Wang B., Zhang Q. Advances in low-level jet research and future prospects // *J. Meteorol. Res.* 2014. V. 28, N 1. P. 57–75. DOI: 10.1007/s13351-014-3166-8.
29. Banta R.M., Pichugina Y.L., Newsom R.K. Relationship between low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 2003. V. 60, N 20. P. 2549–2555. DOI: 10.1175/1520-0469(2003)060<2549:RBLJPA>2.0.CO;2.
30. Sogachev A., Leclerc M.Y. On concentration footprints for a tall tower in the presence of a nocturnal low-level jet // *Agric. Forest Meteorol.* 2011. V. 151, N 6. P. 755–764. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.10.004.

M.Yu. Shikhovtsev, A.Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo, V.A. Obolkin, Ye.V. Molozhnikova. Influence of air movement structure on the microphysical properties of the atmosphere over Listvyanka.

At present, the relationship between sulfur dioxide (SO₂) concentration and small-scale turbulence within Southern Baikal has been described in a limited volume. The paper presents the results of a study of jet streams and atmospheric turbulence affecting the surface SO₂ content over Listvyanka station. The cases are considered when the surface SO₂ concentration tends to increase at negative vertical turbulent specific heat fluxes. This occurs against the background of the formation of jet streams within the lower layer of the atmosphere and large vertical shears of the wind speed below the jet formation height. The vertical turbulent specific heat flux in the surface layer of the atmosphere can serve as a key indicator determining the possibility of a positive relationship between the surface SO₂ concentration and the total kinetic energy of turbulence. The analysis revealed that the SO₂ concentration tends to increase at negative vertical turbulent temperature fluxes against the background of the development of low-level jet streams. In similar situations, but with positive or close to zero temperature flux values, SO₂ concentrations usually remain at background levels.