

## СТАТЬИ

УДК 622.4:551

DOI 10.17513/use.38402

**АНАЛИЗ МЕТЕОДАНЫХ НА КРАЮ КАРЬЕРА  
КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ «МИР»****Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышева А.А.,  
Невзорова И.В., Одинцов С.Л.***ФГБУН Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения  
Российской академии наук, Томск, e-mail: nevzorova@iao.ru*

В статье представлены результаты анализа экспериментальных данных по скорости и направлению ветра, а также по некоторым характеристикам турбулентности, полученным в сложных орографических условиях – на краю карьера кимберлитовой трубки «Мир» (г. Мирный, Республика Саха (Якутия)). Измерения проводились с использованием ультразвуковой метеостанции «Метео-2» на высоте 10 м от уровня подстилающей поверхности. Рассмотрено два периода измерений – с июня по август 2023 г. и с ноября 2023 г. по февраль 2024 г. Приведена статистика скорости и направления ветра для этих периодов. Рассмотрена взаимосвязь кинетической энергии турбулентности и вертикального турбулентного потока тепла со скоростью и направлением ветра. Обсуждаются особенности этих взаимосвязей. В частности, как в летний, так и в зимний период при ветре с «материка» на карьер вертикальный турбулентный поток тепла в целом имеет положительные значения и увеличивается с увеличением «фоновой» скорости ветра. При ветре с карьера на точку наблюдения в летнее время наблюдается противоположная закономерность – при увеличении «фоновой» ветра поток тепла стремится к отрицательным значениям. Для зимних условий при данном направлении ветра какая-либо взаимосвязь между потоком тепла и скоростью «фоновой» ветра практически отсутствует. Полученные результаты могут быть полезны при изучении процессов перераспределения аэрозольных и газовых загрязнений в глубоких карьерах.

**Ключевые слова:** атмосфера, аэротермодинамические процессы, глубокий карьер, метеорологические параметры, турбулентность

**ANALYSIS OF METEOROLOGICAL DATA AT THE EDGE  
OF THE MIR KIMBERLITE PIPE QUARRY****Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamysheva A.A.,  
Nevzorova I.V., Odintsov S.L.***V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, e-mail: nevzorova@iao.ru*

Experimental data on the wind speed and direction, as well as some turbulence characteristics, obtained under complex orographic conditions, namely, at the edge of the Mir kimberlite pipe quarry (city of Mirny, Republic of Sakha Yakutia, Russia) are analyzed. The measurements were conducted with the Meteo-2 ultrasonic weather station at a height of 10 m above the underlying surface. Two measurement periods (June-August of 2023 and November 2023 – February 2024) are examined. The statistics of the wind speed and direction for these periods is presented. The correlations of the wind speed and direction with the turbulence kinetic energy and vertical turbulent heat flux are considered, and features of these correlations are discussed. In particular, in the summer and in the winter, in the wind from the “mainland” to the quarry, the vertical turbulent heat flow as a whole has positive values and increases with an increase in the “background” wind speed. In the wind from the quarry to the observation point in the summer, the opposite pattern is observed – with an increase in the “background” wind, the flow of heat strives for negative values. For winter conditions under this direction of wind, any relationship between the heat flow and the speed of the “background” wind is practically absent. The results obtained can be useful when studying the processes of redistribution of aerosol and gas pollution in deep quarries.

**Keywords:** atmosphere, aerothermodynamic processes, deep quarry, meteorological parameters, turbulence

**Введение**

Одной из важных экологических проблем является загрязнение воздуха аэрозолем и вредными газами глубоких карьеров. Об актуальности данной проблемы можно судить по оценкам времени, когда в таких условиях загрязняющие воздух примеси превышают предельно допустимые концентрации [1, 2]. Ее решению посвящен ряд публикаций, связанных как с модели-

рованием аэротермодинамических процессов, так и с обсуждением возможных методов принудительной вентиляции карьеров для уменьшения степени загрязненности воздуха. В частности, в публикациях [3–5] представлены результаты моделирования циркуляции воздуха в глубоких карьерах с учетом характеристик «фоновой» ветрового поля. В материалах [6–8] оценивается в том числе эффективность естественного

проветривания карьеров. Особую важность при этом имеет влияние температурной стратификации на концентрацию загрязняющих примесей, что специально обсуждается, например, в [9, 10] и в ряде предыдущих ссылок. При разработке методов принудительной вентиляции карьеров также приходится учитывать текущие метеорологические условия. Это касается как чисто «механических» способов проветривания [11, 12], так и более сложных (комплексных) методик удаления из карьеров примесей, загрязняющих воздух [13, 14]. Для моделирования (прогноза) аэротермодинамических процессов в условиях глубоких карьеров и при реализации методов уменьшения загрязненности воздуха необходимы базы данных по основным метеорологическим параметрам в различные сезоны года и время суток. Такие базы использовались, например, в работах [15, 16] и в некоторых из отмеченных ранее публикаций. Понятно, что для более эффективного анализа особенностей циркуляции воздуха в карьерах желательнее иметь как можно больше экспериментальных данных по скорости ветра и температуре воздуха, включая характеристики турбулентности.

В представленном далее материале рассматриваются некоторые характеристики турбулентности, полученные на верхней границе (на первом рабочем уступе) карьера кимберлитовой трубки «Мир» в г. Мирный, Республика Саха (Якутия) за период с 3 мая 2023 г. по 3 мая 2024 г. В данном пункте работал комплекс оборудования в составе акустического метеорологического локатора (содара) «Волна-4М» и ультразвуковых метеостанций (УЗМ) «Метео-2». Оба вида приборов – разработка Института оптики атмосферы СО РАН. Содар обеспечивал измерение скорости и направления ветра в диапазоне высот 30–300 м от уровня размещения (с шагом по высоте 10 м), а две УЗМ – измерение трех ортогональных компонентов вектора ветра, температуры и влажности воздуха, а также атмосферного давления на высотах 5 и 10 м.

Поскольку наименее изученной в условиях глубоких карьеров является турбулентность, то были рассмотрены две ее характеристики – кинетическая энергия (КЭТ), как индикатор возмущенности потока ветра, и вертикальный турбулентный поток тепла, как индикатор потоков консервативных примесей (аэрозоля, газов). Эти характеристики входят практически во все уравнения для моделирования про-

цессов в рассматриваемых условиях (см., например, [6]). Далее для анализа используются результаты измерений с помощью УЗМ на высоте 10 м (от уровня площадки). Понятно, что результаты в единственной точке вблизи верхней границы карьера не могут служить основой для полномасштабного моделирования аэротермодинамических процессов по всему карьере. Но как «контрольную» точку эти результаты использовать можно.

**Цель исследования** – с использованием экспериментальных данных провести анализ зависимости кинетической энергии турбулентности и вертикального турбулентного потока тепла от скорости и направления среднего ветра в разные сезоны года на краю глубокого карьера.

### Материалы и методы исследования

Общий вид карьера приведен на рис. 1, а. Его диаметр составляет примерно 1200 м, глубина карьера около 500 м (карьер частично залит водой). На этом же рисунке показан пункт размещения измерительного комплекса с северо-западной (рис. 1, б) и юго-западной (рис. 1, в) сторон. Метеорологические величины, измеряемые с помощью УЗМ, непрерывно регистрировались с частотой 10 Гц. Для их обработки использовалось специализированное программное обеспечение. Выделение турбулентных составляющих проводилось путем вычитания из исходных выборок скользящих средних метеорологических величин с «временным окном» 120 с. Рассматривались продольные, поперечные и вертикальные составляющие вектора ветра. Скорость продольного ветра определялась вдоль среднего направления ветра, которое, в свою очередь, вычислялось по осредненным горизонтальным компонентам вектора ветра «север – юг / запад – восток». Более подробно с методикой обработки можно ознакомиться, например, в публикации [17].

Далее используются следующие обозначения. По ветру:  $U, W$  – средние значения скорости продольного и вертикального ветра (м/с),  $u', v', w'$  – турбулентные составляющие продольного, поперечного и вертикального ветра (м/с) и соответствующие им дисперсии  $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$  (м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>),  $V_h$  – среднее значение модуля скорости горизонтального ветра (м/с),  $\phi$  – направление среднего ветра (градусы; азимут, откуда дует ветер). По температуре:  $T$  – среднее значение температуры,  $T'$  – турбулентная составляющая температуры.

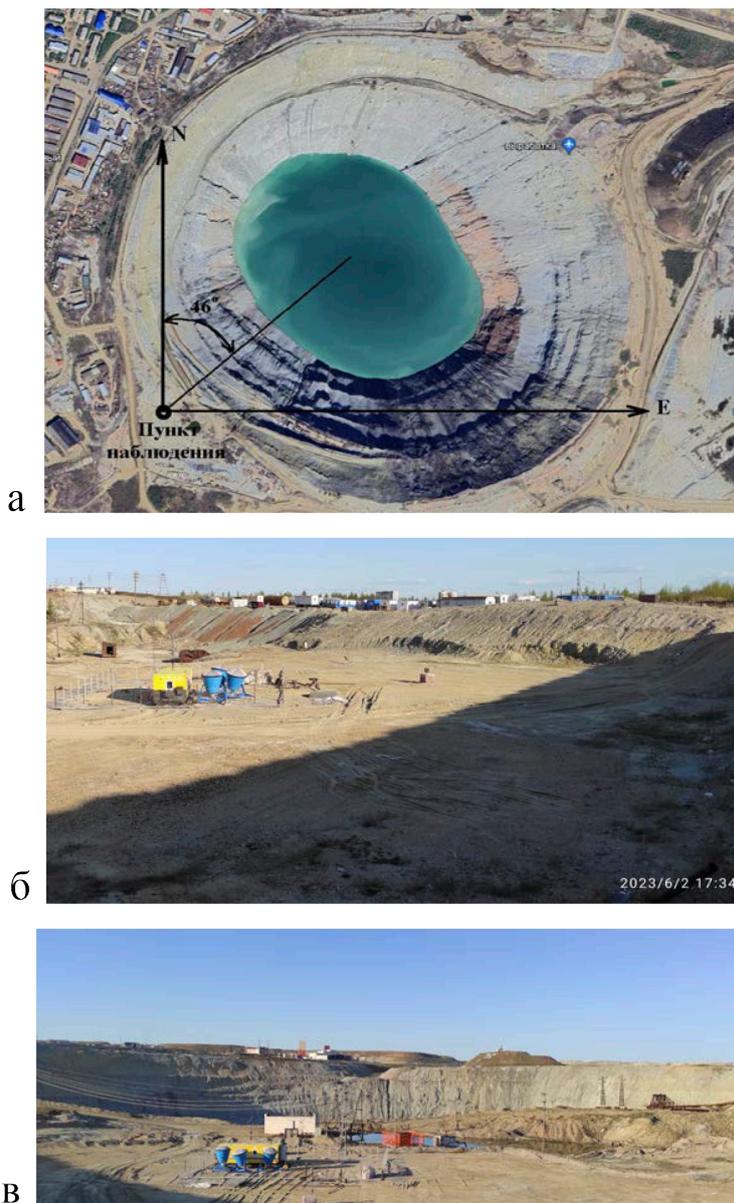


Рис. 1. Вид на карьер: (а) сверху, (б) с северо-запада, (в) с юго-запада (фото авторов)

Величина кинетической энергии турбулентности определялась по формуле

$$E = 0,5 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2),$$

а вертикальный турбулентный поток тепла – по формуле  $Q = c_p \rho w' T'$  (Вт/м<sup>2</sup>), где  $c_p = 1006$  (Дж/(кг·К)),  $\rho$  – плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>), черта над произведением – знак осреднения по интервалу времени  $\Delta t$ . Основные результаты, представленные далее, получены при  $\Delta t = 10$  мин.

Для анализа были выбраны следующие интервалы времени: летний – с июня по ав-

густ 2023 г. (1981 ч наблюдений), и зимний – с ноября 2023 г. по февраль 2024 г. (2565 ч наблюдений).

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа метеорологических параметров в пункте наблюдения представлены далее в основном в графическом виде. Такой формат авторы считают наиболее оптимальным для иллюстрации сделанных в итоге выводов.

На рис. 2 представлена общая метеорологическая ситуация в выбранных эпизодах.

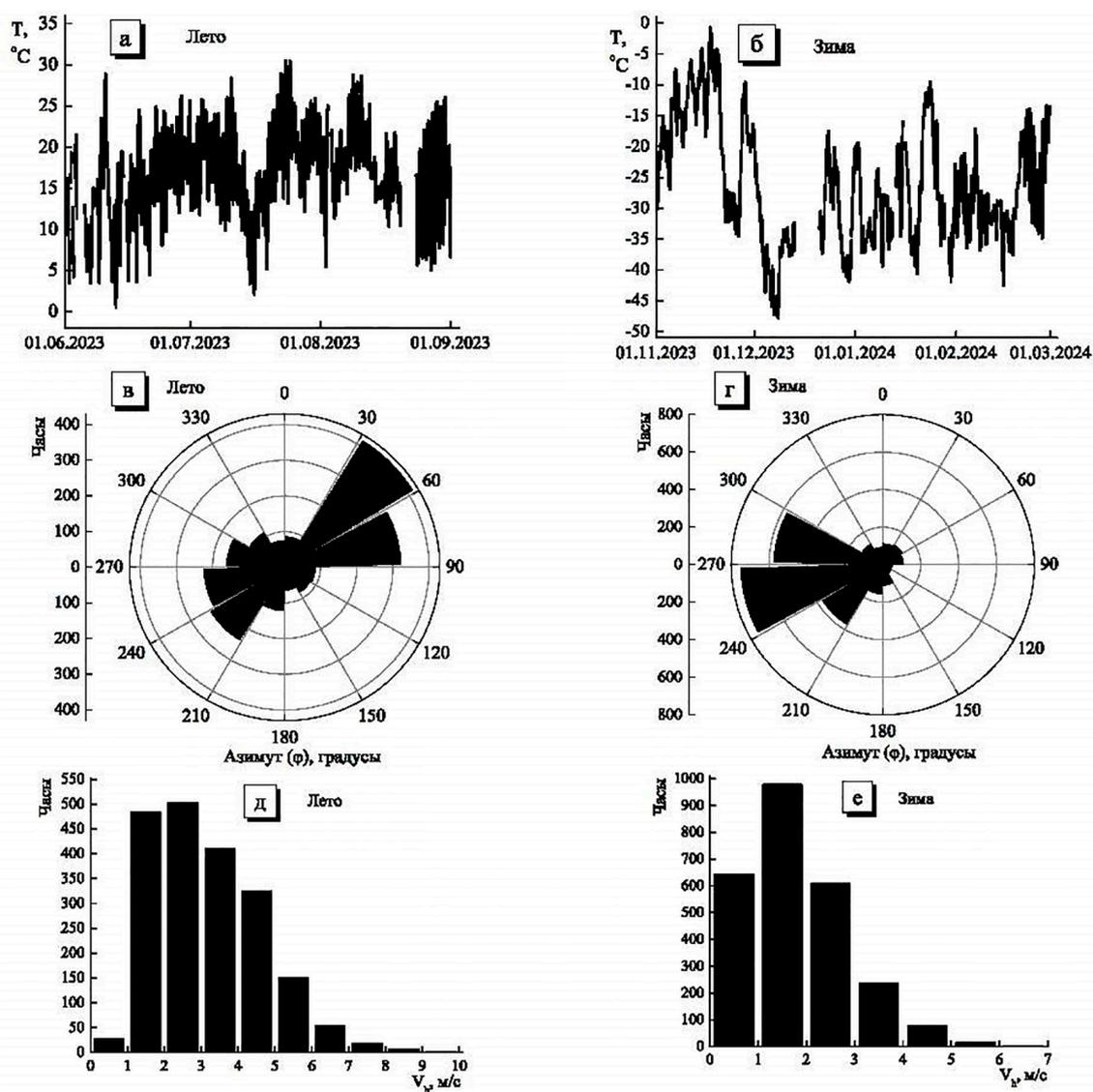


Рис. 2. Температура воздуха (а, б), гистограммы направления (в, г) и скорости (д, е) ветра на высоте 10 м в летний (а, в, д) и зимний (б, г, е) периоды  
 Источник: составлено авторами

В левой колонке рисунка 2 показаны данные по летнему эпизоду, а в правой – по зимнему. Графики температуры воздуха приведены на рис. 2, а, б. Суммарная продолжительность ветра с тех или иных направлений (в секторах по 30°) демонстрируется на рис. 2, в, г. Отмечено, что в летнем эпизоде (рис. 2, в) направление ветра из диапазона 0–180° по длительности примерно совпадало с направлением из диапазона 180–360° (хотя и с разной продолжительностью в отдельных секторах). А в зимнее время (рис. 2, г) примерно в 65% времени направление ветра соответствовало диапазону 210–300° и в 80% – диапазону 180–360°.

Скорость ветра на высоте 10 м в летний сезон в целом была больше, чем в зимнее время. Это продемонстрировано на гистограммах (рис. 2, д, е). Отмечено, что в зимнее время довольно часто (примерно 25% времени) реализовались ситуации, близкие к штилю (диапазон скорости 0–1 м/с). Летом штиль практически отсутствовал.

На рис. 3, а–г, приведена взаимосвязь скорости и направления ветра. Левая колонка графиков – летний эпизод, правая – зимний. Эта взаимосвязь представлена в двух форматах. Первый формат – «облако» точек, соответствующих 10-минутным интервалам измерения (рис. 3, а, б).

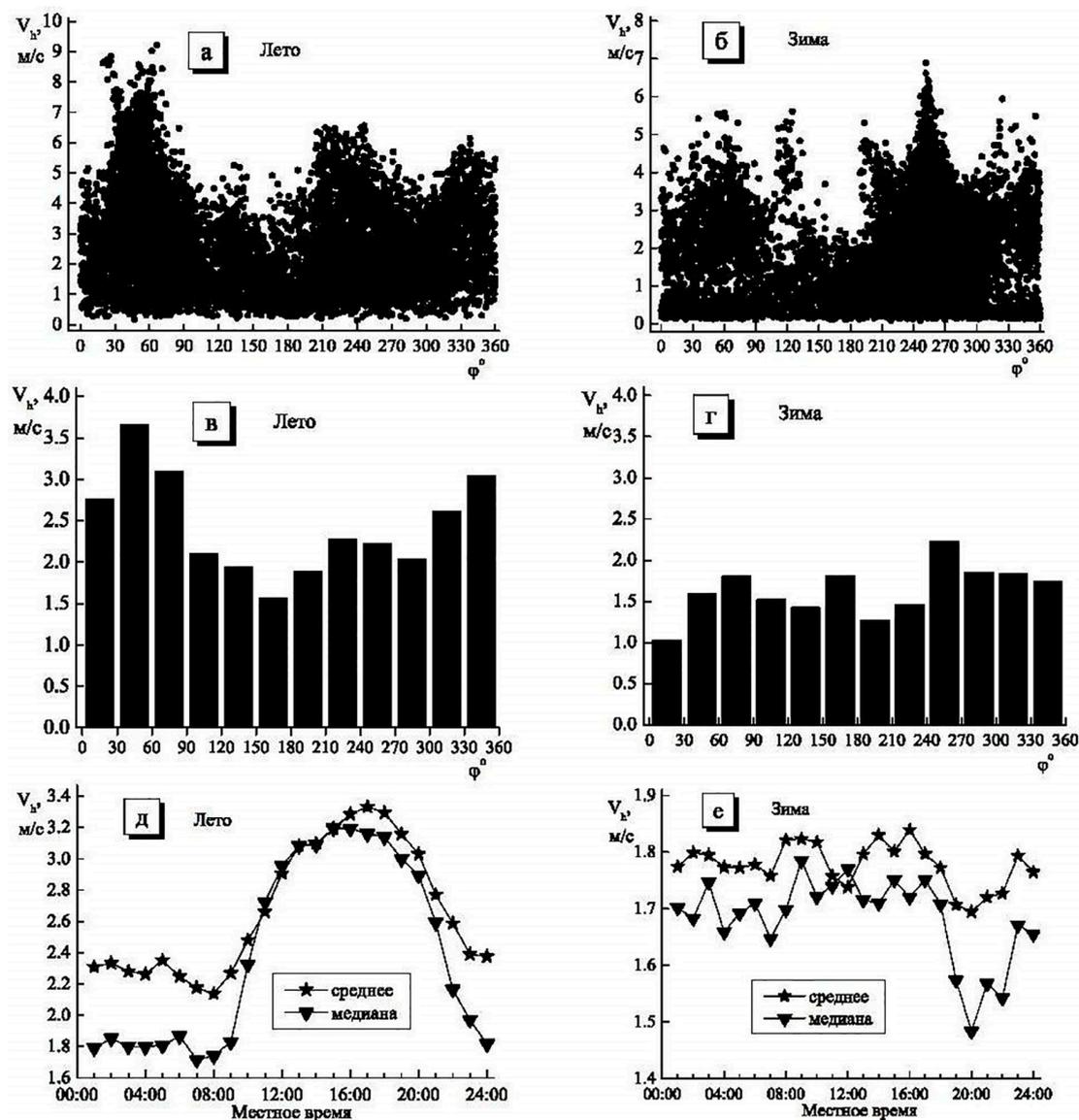


Рис. 3. Значения скорости ветра за 10-минутные интервалы на высоте 10 м при разных направлениях ветра (а, б), средние значения скорости ветра в отдельных секторах направления ветра (в, г), средний суточный ход скорости ветра (д, е).  
 Левая колонка графиков – летний период, правая колонка – зимний период  
 Источник: составлено авторами

Второй формат – средние значения скорости ветра за сезон в том или ином диапазоне направления ветра (рис. 3, в, г). Статистическая обеспеченность оценок средних значений скорости ветра в разных диапазонах направлений существенно различается и может быть оценена по результатам на рис. 2, в, г. Особенно слабая она в зимний период вне диапазона направлений 210–300°. Полезной может быть информация о среднем суточном ходе скорости ветра. На рис. 3, д, е, приведены такие оценки для летнего и зимнего периодов на часовых интервалах.

Причем приведены не только выборочные средние скорости за час, но и ее медианные значения. Различие этих величин свидетельствует о несимметричности плотности распределения скорости ветра. В частности, если медианное значение на каком-либо часовом интервале существенно меньше среднего, то в обработанной выборке имели место большие по скорости, но непродолжительные ветра. Согласно рис. 3, д, е, средний суточный ход был хорошо выражен лишь в летнее время. Зимой только к концу суток наступало определенное затишье,

но при этом были и сильные кратковременные ветра, вносящие существенный вклад в оценку средних значений. Для направле-

ния ветра, как в летнее, так и в зимнее время средний суточный ход отсутствовал. Этот вывод оставлен без иллюстраций.

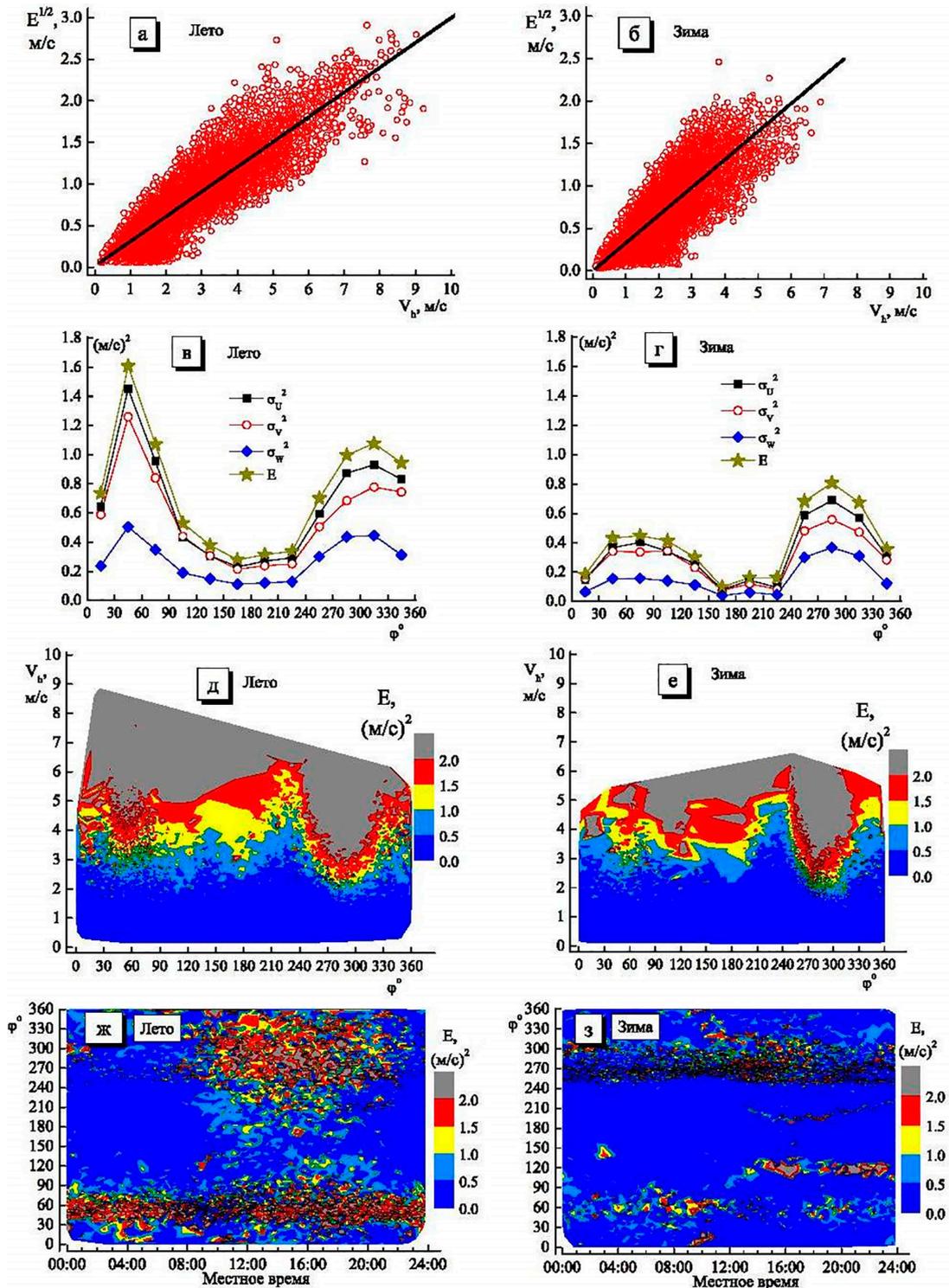


Рис. 4. Зависимость КЭТ от скорости ветра (а, б), зависимость КЭТ и дисперсий компонентов вектора ветра от направления ветра (в, г), взаимосвязь КЭТ со скоростью и направлением ветра (д, е), суточный ход КЭТ при разных направлениях ветра (ж, з).

Левая колонка графиков – летний период, правая – зимний

Источник: составлено авторами

*Кинетическая энергия  
турбулентности*

Далее рассмотрены результаты по кинетической энергии турбулентности (КЭТ) и в первую очередь ее взаимосвязь со скоростью и направлением ветра. На рис. 4, а, б, приведены «облака» экспериментальных значений  $\sqrt{E}(V_h)$ , где каждая точка соответствует 10-минутному интервалу осреднения (левая колонка графиков – лето, правая – зима). Здесь же прямыми линиями обозначены результаты линейной аппроксимации этой зависимости, то есть  $E^{1/2} \approx a + b \cdot V_h$ . В летнем эпизоде  $a \approx 0,017$ ,  $b \approx 0,3$ , а в зимнем –  $a \approx 0,0014$ ,  $b \approx 0,33$ . Коэффициенты детерминации этих аппроксимаций не очень высокие (летом 0,797, зимой 0,702). Для обоих сезонов года взаимосвязь КЭТ со скоростью ветра в целом однотипна.

Связь КЭТ с направлением ветра продемонстрирована на рис. 4, в, г (КЭТ – звездочки на графиках). В данном случае было проведено осреднение КЭТ в каждом из 30-градусных секторов направления. Здесь же для справки приведены и осредненные значения дисперсий ортогональных компонентов вектора ветра, формирующие величину КЭТ. Сразу обращает на себя внимание «бимодальность» зависимости  $E(\varphi)$  как в летнее, так и в зимнее время. Причем в летнее время поток ветра со стороны карьера на точку наблюдения (грубо – из диапазона  $30^\circ < \varphi < 90^\circ$ ) приводит к существенно большему значению КЭТ, чем в летнее время. Однако и средняя скорость ветра в этом диапазоне направлений летом больше, чем зимой (рис. 3, а–г).

Отмечена также существенная анизотропия турбулентности (различие дисперсий компонентов вектора ветра), особенно при направлении ветра с западных румбов. Взаимосвязь КЭТ одновременно со скоростью и направлением ветра  $E(V_h, \varphi)$  демонстрируется на рис. 4, д, е. Градация КЭТ по величине приведена справа от графиков. Эти графики построены фактически по координатам точек на рис. 3, а, б, то есть по результатам с 10-минутным осреднением. Каждой точке на графиках рис. 3, а, б, соответствует свое значение КЭТ. При построении графиков на рис. 4, д, е, области с отсутствием точек (рис. 3, а, б) заполнены вероятными значениями КЭТ из-за использования процедуры сглаживания. Сразу же обращает на себя внимание область направлений (грубо  $270\text{--}300^\circ$ ), где даже при небольших скоростях ветра величина КЭТ

в пункте наблюдения принимает большие значения, как в летнее, так и в зимнее время. Статистическая обеспеченность оценок в этой области как по скорости, так и по направлению ветра достаточно высокая (см. «облака» точек на рис. 3, а, б).

В заключение изложения результатов, связанных с КЭТ, на рис. 4, ж, з, приводится средний суточный ход КЭТ одновременно и как функция направления ветра. Градация КЭТ по величине указана справа от графиков. При построении данного рисунка вновь использованы 10-минутные оценки КЭТ. Поэтому имеет место такая высокая степень «пятнистости» графиков, несмотря на использование процедуры сглаживания. Очевидно, что суточный ход величины КЭТ в какой-то мере выражен только в летнее время, он определяется, видимо, суточным ходом скорости ветра (рис. 3, д, е). При этом в летнее время в диапазоне направлений (грубо)  $30\text{--}60^\circ$  величина КЭТ может иметь большие значения вне зависимости от времени суток.

*Вертикальный турбулентный  
поток тепла*

Так же был рассмотрен вертикальный турбулентный поток тепла, который может служить индикатором турбулентного переноса и других консервативных примесей (аэрозоля, газов). Понятно, что результаты в значительной степени связаны с конкретной орографией в пункте наблюдения. Тем не менее материал может быть полезен для понимания процессов турбулентного теплообмена и в других подобных условиях.

На рис. 5, а, б, представлена взаимосвязь потока тепла  $Q$  с направлением ветра для заданных периодов (сезонов) года. «Облака» мелких точек на графиках соответствуют 10-минутным интервалам осреднения. Здесь же крупными символами указаны их осредненные значения по 30-градусным секторам направления ветра. Вертикальными отрезками показаны оценки среднеквадратических отклонений. Графики приведены в едином формате для более удобного сопоставления результатов в разные сезоны года. В зимнее время (рис. 5, б) диапазон вариаций  $Q$  заметно меньше, чем в летнее (рис. 5, а).

Необходимо отметить, что при ветре с западных румбов (с «материка» в сторону карьера через пункт наблюдения) как летом, так и зимой положительные потоки тепла могут быть существенно больше (как

в среднем, так и по 10-минутным интервалам) по сравнению с другими направлениями ветра. В то же время для этих румбов наблюдается «противофаза» в поведении средней скорости вертикального ветра  $W$  (рис. 5, в, г): как в среднем (по секторам), так и по 10-минутным интервалам она имеет в целом отрицательные значения. При сравнении рис. 5, а, и рис. 5, в, обращает на себя внимание проявление «противофазы» знаков  $Q$  и  $W$  в летнее время для северо-восточных румбов. Величина и знак вертикального ветра  $W$  при его направлении с юго-западных и северо-восточных румбов связаны с процессами «стока» в первом случае и «натекания на препятствие» во втором. Слабо выраженная область положительных значений  $W$  с северо-восточных румбов в зимнее время объясняется, видимо, слабой статистической обеспеченностью оценок (рис. 2, г) и небольшими скоростями горизонтального ветра (рис. 3, г).

На некоторых конкретных примерах были рассмотрены вариации  $Q$  и  $W$  в наиболее интересных диапазонах направления ветра. На рис. 6 приведены графики направления ( $\varphi$ ) и скорости ( $V_h$ ) среднего ветра, а также  $Q$  и  $W$  в период 18–22.07.2023. Этот эпизод характерен направлением ветра в основном с западных румбов (рис. 6, а; поток ветра с «материка» на карьер через точку наблюдения). На рис. 6–8 по оси абсцисс указаны только даты и месяц 2023 г.

Отмечен хорошо выраженный суточный ход скорости ветра  $V_h$  (рис. 6, в) и потока тепла  $Q$  (рис. 6, б). Поведение  $Q$  типично для летнего времени над равнинной местностью: днем существенные положительные значения, а ночью – отрицательные или близкие к нулю. При этом интенсивный турбулентный теплообмен происходит в основном при отрицательных (средних за 10 мин) значениях вертикального ветра  $W$  (ср. рис. 6, б, и рис. 6, г).

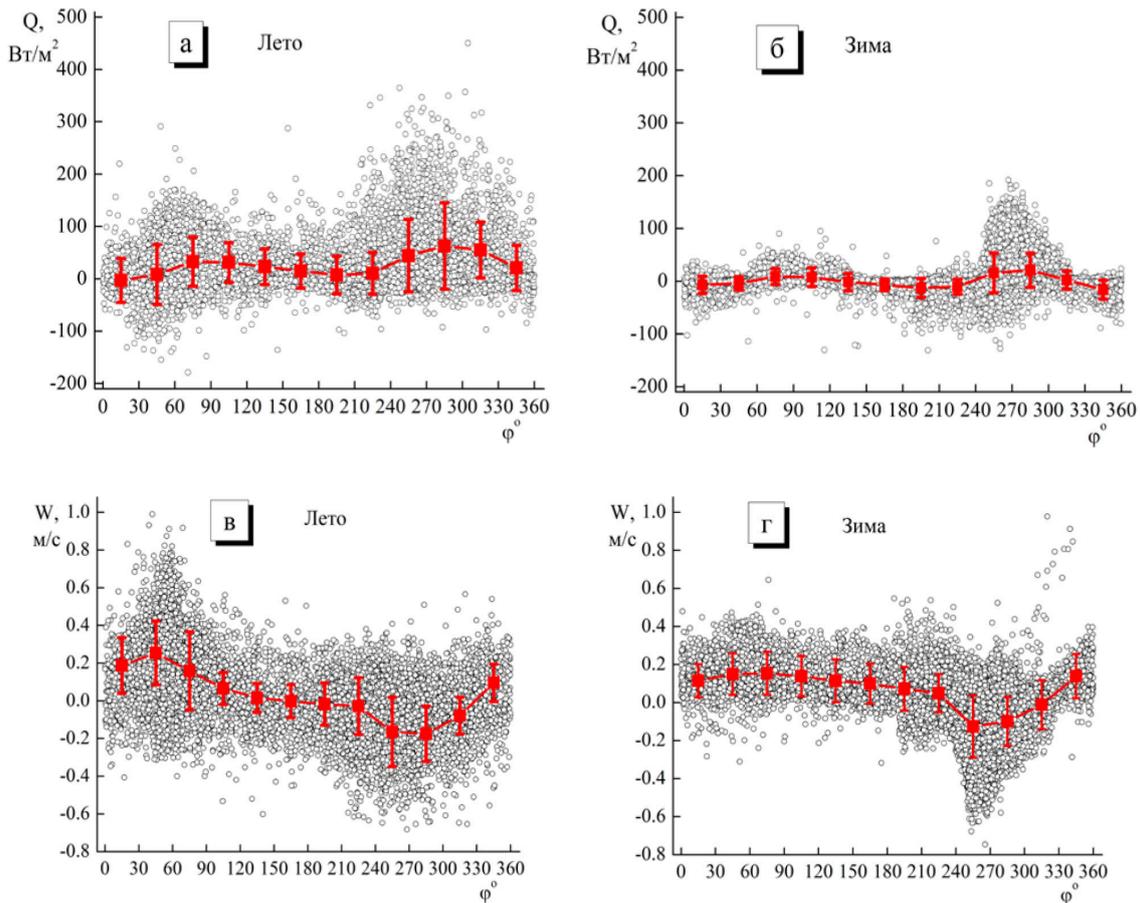


Рис. 5. Зависимость вертикального турбулентного потока тепла (а, б) и скорости вертикального ветра (в, г) от направления ветра: левая колонка графиков – летний период, правая – зимний  
Источник: составлено авторами

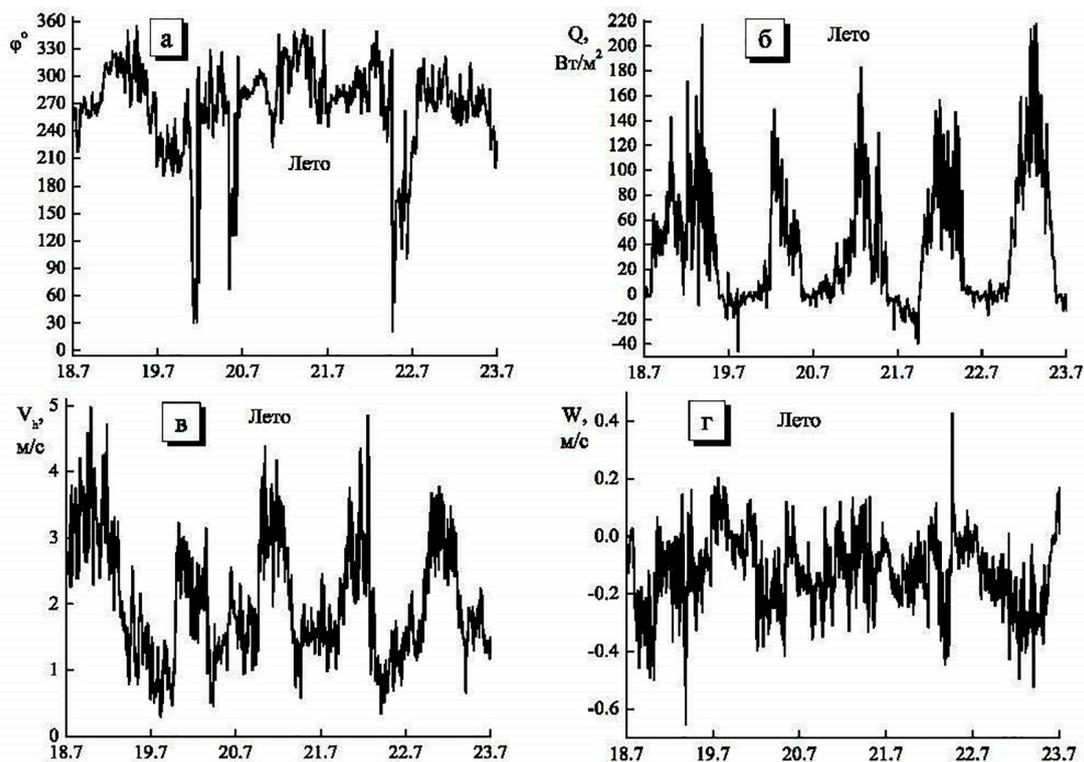


Рис. 6. Направление (а) и скорость (в) горизонтального ветра, вертикальный турбулентный поток тепла (б), скорость вертикального ветра (г)  
 Источник: составлено авторами

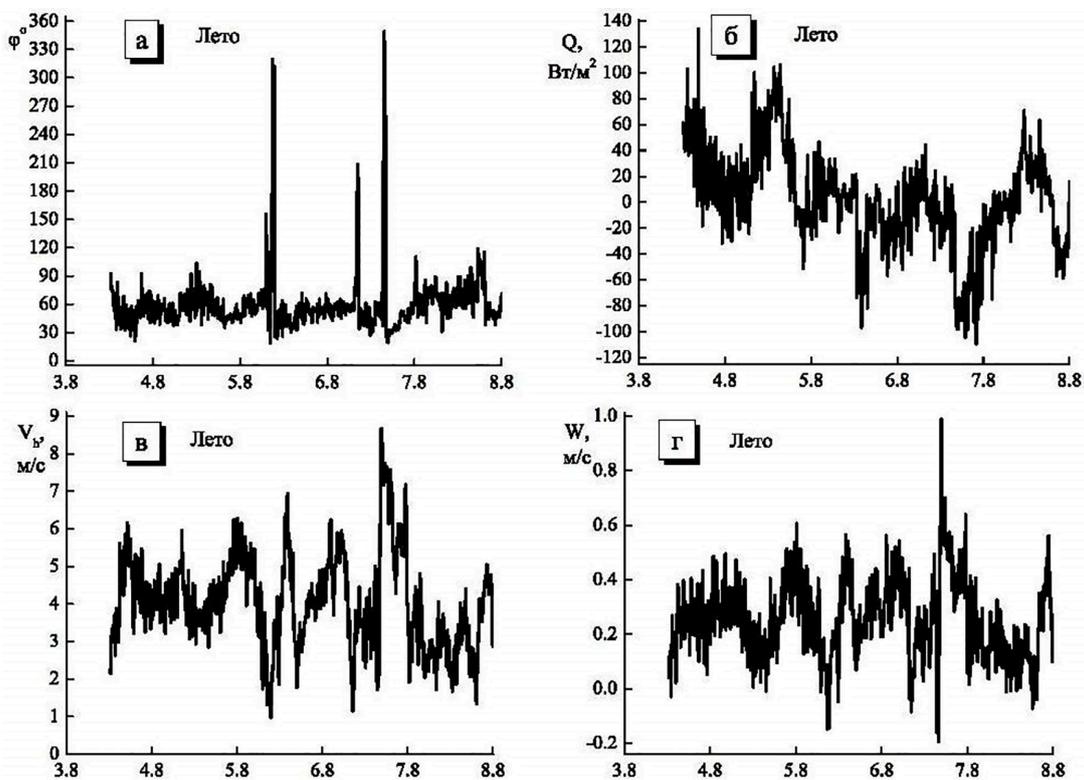


Рис. 7. Направление (а) и скорость (в) горизонтального ветра, вертикальный турбулентный поток тепла (б), скорость вертикального ветра (г)  
 Источник: составлено авторами

На рис. 7 приведен пример для летнего сезона (3–7.08.2023), но при потоке ветра со стороны карьера на точку наблюдения, то есть с восточных – северо-восточных румбов (рис. 7, а). В этом случае вертикальная составляющая ветра  $W$  практически всегда была больше нуля (рис. 7, г). При этом суточный ход  $Q$  (рис. 7, б) и  $V_h$  (рис. 7, в) выражен не очень явно, существенно отличаясь от результатов, приведенных для рассмотренного выше летнего эпизода (рис. 6). Тут нет четкого пояснения, обусловлено ли это влиянием карьера или особенностями «фонового» потока, натекающего на карьер с восточных – северо-восточных румбов. Тем не менее некоторая взаимосвязь потока тепла  $Q$  со скоростями ветра  $V_h$  и  $W$  все же имеется.

Далее, на рис. 8 представлен пример результатов для зимнего сезона (9–15.11.2023), характерных при направлении ветра с западных румбов, когда имеется специфическая взаимосвязь между  $Q$  и  $W$  (рис. 5, б, г).

В этом эпизоде есть интервал времени (13 и 14 ноября) с существенным отклонением направления ветра от западных румбов (рис. 8, а). Этот интервал включен для демонстрации изменения взаимосвязи величин  $Q$  и  $W$ . Здесь отмечено отсут-

ствие выраженного суточного хода для всех представленных на рис. 8 параметров, в отличие от летнего эпизода 18–22.07.2023 (рис. 6). И это характерно для всего зимнего периода, а не только для показанного на рис. 8 примера. Как и в случае летнего эпизода, в зимнее время при ветре с запада скорость его вертикальной составляющей в целом отрицательна, а турбулентные потоки тепла – положительны.

Далее приведено некоторое обобщение взаимосвязей величин  $Q$  с  $V_h$  и  $W$ . На рис. 9 показаны 2D-графики функции  $Q(V_h, W)$  для двух диапазонов направлений ветра. В частности, на рис. 9, а, приведен график  $Q(V_h, W)$  для летнего периода (01.06–31.08.2023) при направлении ветра из диапазона  $210–300^\circ$  (с «материка» на карьер через точку наблюдения). Поток ветра из этого диапазона суммарно охватывал примерно треть (627 ч) от всего летнего периода (рис. 2, в). При этом примерно в 61 % времени поток тепла был положительным. Результаты на рис. 9, а, позволяют сделать вывод, что с увеличением средней скорости ветра  $V_h$  увеличивается скорость вертикального ветра  $W$  (со знаком минус) и существенно увеличивается вертикальный турбулентный поток тепла  $Q$  (со знаком плюс).

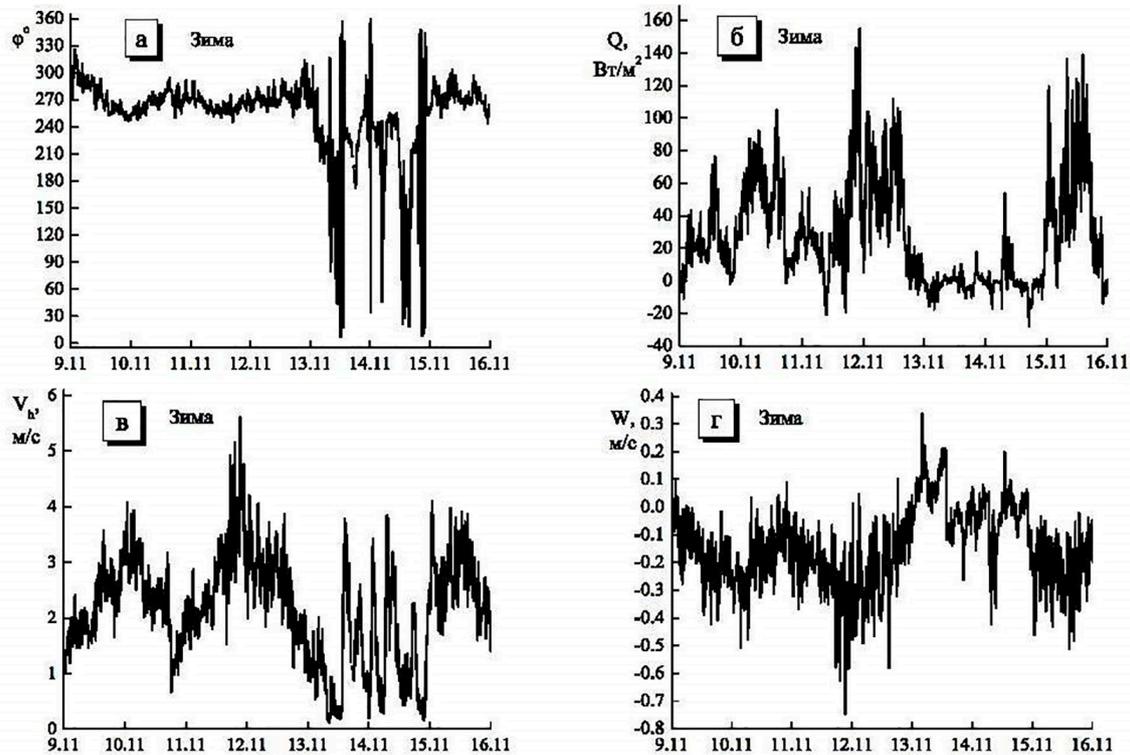


Рис. 8. Направление (а) и скорость (в) горизонтального ветра, вертикальный турбулентный поток тепла (б), скорость вертикального ветра (г)

Источник: составлено авторами

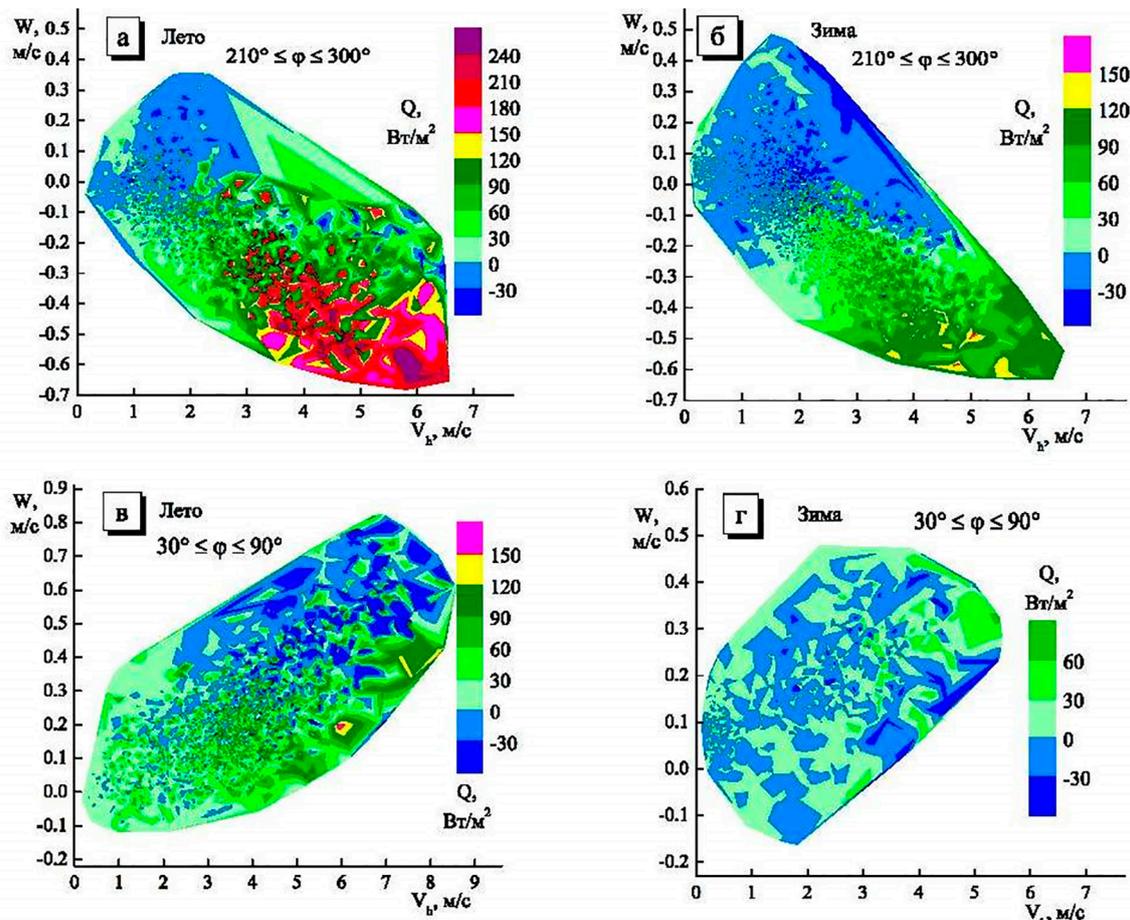


Рис. 9. Взаимосвязь вертикального турбулентного потока тепла со скоростью горизонтального и вертикального ветра при направлении ветра из двух различных секторов (указаны на рисунках) в летний (а, в) и зимний (б, г) периоды  
 Источник: составлено авторами

Такой же вывод имеет место для зимнего периода (01.11.2023–29.02.2024) при потоке ветра из диапазона направлений  $210\text{--}300^\circ$  (рис. 9, б). Только значения (положительные) потока тепла  $Q$  при больших скоростях ветра меньше, чем для летнего периода. Статистическая обеспеченность этих результатов в целом высокая и составляет 1645 ч наблюдений (64% от общей длительности измерений в зимнем эпизоде). Положительные значения потока тепла зарегистрированы примерно в 53% времени.

Противоположные закономерности наблюдаются (рис. 9, в) в летнее время при направлении ветра из диапазона  $30\text{--}90^\circ$  (от карьера на точку наблюдений; суммарно 737 ч; из них 70% времени с положительным потоком тепла): с ростом средней скорости ветра возрастает вертикальный ветер (со знаком плюс), а потоки тепла стремятся к отрицательным значениям. При ветре из этого же

диапазона направлений, но в зимнее время выраженное влияние вертикального и горизонтального ветра на турбулентный поток тепла отсутствует (рис. 9, г). Правда, этот вывод следует только из 230 ч наблюдений, когда в зимнее время ветер дул из сектора  $30\text{--}90^\circ$ . Положительный поток тепла присутствовал в 57% времени.

Следует принять во внимание, что представленные на рис. 9 графики на своих границах имеют не очень высокую статистическую обеспеченность, а также то, что графики построены с некоторым сглаживанием. Но это не меняет общую картину поведения функции  $Q(V_h, W)$ .

Есть еще одно замечание, связанное с разложением полей ветра и температуры воздуха только на две составляющие – детерминированную и турбулентную. Сложная орографическая структура может привести к появлению существенных мезомасштаб-

ных (мезогамма) вариаций этих полей. Это означает, что для более корректного моделирования аэротермодинамических процессов в глубоких карьерах следует включать в используемые для расчетов уравнения помимо детерминированных и турбулентных компонентов еще и вариации масштаба мезогамма. Предварительные результаты с оценками таких вариаций в случае карьера «Мир» опубликованы в [18]. Необходимость учета мезомасштабных вариаций полей ветра и температуры воздуха даже в «простых» (равнинных) условиях указана авторами в [19–21].

### Заключение

Подводя итоги анализа влияния скорости и направления ветра на кинетическую энергию турбулентности и вертикальный турбулентный поток тепла на краю глубокого карьера, можно выделить следующее:

– Даже при небольших скоростях ветра величина КЭТ при направлении ветра с «материка» на карьер (на первый рабочий уступ) может принимать достаточно большие значения в любой сезон года. Средний суточный ход величины КЭТ хорошо выражен только в теплое время года и при ветре с западных румбов.

– Как в летний, так и в зимний период при ветре с «материка» на карьер вертикальный турбулентный поток тепла в целом имеет положительные значения и увеличивается с увеличением «фоновой» скорости ветра. При ветре с карьера на точку наблюдения в летнее время наблюдается противоположная закономерность: при увеличении «фоновой» ветра поток тепла стремится к отрицательным значениям. Для зимних условий при данном направлении ветра какая-либо взаимосвязь между потоком тепла и скоростью «фоновой» ветра практически отсутствует (возможно, из-за слабой статистической обеспеченности оценок).

Результаты предварительного сравнения измеренных на высотах 10 и 30 м (с помощью содара) значений скорости и направления ветра демонстрируют в ряде случаев заметное различие. В частности, примерно в 20% времени скорость ветра на высоте 10 м была несколько больше, чем на высоте 30 м (в 3% времени более чем на 1 м/с), вне зависимости от направления ветра (но в основном в летнее время). Полноценный совместный анализ результатов работы УЗМ и содара является отдельной задачей, которую планируется решить при дальнейших исследованиях

### Список литературы

1. Месяц С.П., Петров А.А., Новожилова М.Ю., Аврина О.В. Оценка состояния атмосферы внутрикарьерного пространства на основе мониторинга метеоусловий, приводящих к скоплению загрязняющих веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 510–523. EDN: VGHOZL.
2. Козырев С.А., Амосов П.В. Моделирование выноса вредных примесей при проветривании глубоких карьеров с помощью вентиляционных горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 390–398. EDN: VGNOPV.
3. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Учет вариативности метеорологических параметров атмосферного воздуха при выборе способа проветривания глубоких карьеров Арктической зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 8. С. 38–55. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_38.
4. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В. Оценка аэрологической обстановки на открытых горных работах на основе трехмерных моделей карьеров // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 178–182. EDN: TZKHEJ.
5. Козырев С.А., Скороходов В.Ф., Никитин Р.М., Амосов П.В., Массан В.В. 3D компьютерное моделирование характера распределения воздушных потоков на поверхности и в карьерном пространстве глубоких карьеров с учетом реального рельефа местности и масштаба карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 399–403. EDN: VGHOSD.
6. Амосов П.В. Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 90–101. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101.
7. Амосов П.В., Бакланов А.А. Численное моделирование процессов естественного проветривания карьера при вариации его глубины в условиях инверсионного состояния атмосферы // Горная промышленность. 2023. № S5. С. 65–71. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71.
8. Бублик С.А., Семин М.А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании // Горное эхо. 2022. № 1 (86). С. 126–133. DOI: 10.7242/echo.2022.1.20.
9. Амосов П.В., Новожилова Н.В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 528–534. EDN: VGNHAP.
10. Драгунский О.Н. О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 5. С. 13–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.
11. Гридина Е.Б., Боровиков Д.О. Повышение безопасности труда рабочего персонала карьера, расположенного в сложных горно-геологических условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9–1. С. 149–163. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_149.
12. Ковлеков И.И. Интенсификация проветривания глубоких алмазных карьеров смерчеобразными вихрями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5–2. С. 124–135. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-52-0-124.
13. Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Долкан А.А., Попов Е.В. Способы проветривания карьеров // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 6. С. 58. URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN620.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).
14. Шахрай С.Г., Курчин Г.С., Сорокин А.Г. Новые технические решения по проветриванию глубоких карьеров // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 654–659. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.654.

15. Месяц С.П., Петров А.А. Методология оценки состояния атмосферы внутрикарьерного пространства глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 499–509. EDN: VGHOZB.
16. Федотова Ю.В., Зорин А.В. Анализ метеоданных системы мониторинга состояния атмосферы внутрикарьерного пространства и сейсмической активности массива для оценки устойчивости уступов рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 294–309. EDN: VGHOFB.
17. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 03. С. 212–220. DOI: 10.15372/AOO20190307.
18. Мамышева А.А., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Экспериментальная оценка мезомасштабной составляющей ветра над карьером кимберлитовой трубки МИР // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXX Международного симпозиума (Санкт-Петербург, 01–05 июля 2024 г.). Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. С. D209–D214. ISBN 978-5-94458-200-3.
19. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Оценка и сравнение смешанных моментов компонентов вектора ветра турбулентного и мезометеорологического масштабов в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 09. С. 735–747. DOI: 10.15372/AOO20220907.
20. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Ч. 1: Уравнение для температурного поля // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 11. С. 923–931. DOI: 10.15372/AOO20221108.
21. Гладких В.А., Мамышева А.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Анализ производных в уравнениях гидротермодинамики атмосферы с использованием экспериментальных данных. Ч. 2. Уравнения для поля ветра // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 12. С. 1015–1020. DOI: 10.15372/AOO20221208.