

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук

На правах рукописи



Барсков Кирилл Владиславович

**СТРУКТУРА АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
НАД НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2020

Работа выполнена в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Научный руководитель:

Репина Ирина Анатольевна – доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Официальные оппоненты:

Чухарев Александр Михайлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»

Сергеев Даниил Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией в ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Ведущая организация:

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «19» ноября 2020 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.096.01 при Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова РАН и на сайте Института <http://ifaran.ru/science/dissertations/Barskov.html>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: г. Москва, Пыжевский пер., д.3, ученому секретарю диссертационного совета Чернокульскому А.В.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д002.096.01,
кандидат физико-
математических наук



Чернокульский А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена экспериментальному исследованию структуры атмосферного пограничного слоя (АПС) над неоднородными поверхностями.

Актуальность темы:

Современные методы определения характеристик турбулентного обмена между поверхностью Земли и атмосферой основаны на выводах теории подобия Монина-Обухова (ТПМО). В основе ТПМО лежит предположение об однородности подстилающей поверхности, однако реальный ландшафт, как правило, обладает сложной геометрической структурой, что может приводить к ошибкам расчетов с использованием ТПМО, величина которых к настоящему времени изучена недостаточно.

Данные натуральных измерений в условиях пространственной статистической неоднородности атмосферной турбулентности дают только локальное значение потока, не обязательно репрезентативное для ландшафта в целом; при этом, аналитические футпринт-модели, учитывающие неоднородность поверхности, в настоящее время не разработаны.

Топографические неоднородности могут приводить к формированию микромасштабных и мезомасштабных циркуляций, которые влияют на структуру АПС и взаимодействие атмосферы с поверхностью. Формируются когерентные структуры, которые генерируют дополнительный вклад в спектр энергии и коспектры потоков в приземном слое. Исследования показывают, что в случае протяженных ландшафтов с крупными элементами неоднородности (горно-долинный рельеф, лес, городская застройка, морской лёд, прибрежные зоны) при определенных условиях на качественном уровне ТПМО применима. Но в большинстве случаев наблюдения проводились на одной метеорологической мачте с

одним или несколькими уровнями измерений. Расширение эксперимента до нескольких многоуровневых постов дает информацию о существенной пространственной изменчивости турбулентности над неоднородным рельефом. Для расчета характеристик атмосферной турбулентности в этом случае необходим более обобщенный подход, который может содержать, в том числе, и классическую ТПМО как частный случай. Реализация этого подхода возможна с включением в функции подобия новых независимых безразмерных групп или введением новых эмпирических масштабов.

Недостаточное знание структуры пограничного слоя атмосферы и его обмена количеством движения, теплом и влагой с неоднородной поверхностью является в настоящее время одним из существенных препятствий для повышения точности оперативных, глобальных и региональных моделей прогноза погоды, моделей климата и его изменений. Все вышесказанное подтверждает необходимость проведения специализированных экспериментов в неоднородном ландшафте, исследующих как вертикальную, так и горизонтальную структуру турбулентности в приземном слое атмосферы.

Объект исследования:

Атмосферный пограничный слой над неоднородной подстилающей поверхностью.

Предмет исследования:

Структура атмосферной турбулентности и механизмы генерации турбулентных потоков над неоднородными поверхностями.

Основная цель работы:

Идентификация факторов, влияющих на структуру и динамику приземного слоя атмосферы над неоднородной поверхностью при различных условиях стратификации атмосферы.

Основные задачи:

- 1) Экспериментально исследовать структуру атмосферного пограничного слоя над неоднородной поверхностью;
- 2) Определить влияние гладкой топографической неоднородности на турбулентные потоки, ввести соответствующие коррекции универсальных функций в устойчиво-стратифицированном приземном слое;
- 3) Установить влияние разрывной топографической неоднородности на турбулентные потоки и изучить вклад когерентных структур в турбулентные потоки в условиях сильно неоднородной поверхности;
- 4) Определить условия применимости стандартных методов расчета турбулентных потоков, в том числе основанных на теории подобия Монина-Обухова, в случае неоднородных ландшафтов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Для универсальных функций теории подобия Монина-Обухова возможно введение поправок, учитывающих гладкую топографическую неоднородность ландшафта в виде эмпирического базового масштаба длины, зависящего от индивидуальных особенностей топографии и типа подстилающей поверхности в районе измерений. Использование нового эмпирического масштаба позволяет провести коррекцию универсальных функций ТПМО в устойчиво-стратифицированном приземном слое без их существенной модификации по сравнению с универсальными функциями над однородными поверхностями с малыми элементами шероховатости.
- 2) Формирование потока тепла над ландшафтом с разрывной топографической неоднородностью может осуществляться за счет когерентных структур, образующихся в течении за уступом при отрыве потока. Эти структуры обеспечивают турбулентный перенос потока тепла, связанного с адвекцией теплого или холодного воздуха и генерируемого в средних слоях атмосферного пограничного слоя, а не на поверхности.

Турбулентные потоки, сформированные таким образом, могут быть параметризованы через моменты третьего порядка и коэффициент асимметрии распределения пульсаций вертикальной скорости.

3) Значения турбулентных потоков тепла, определенных методом теплового баланса, могут согласовываться со значениями потоков, определенных из ковариации пульсаций даже в условиях сильной неоднородности и при существовании когерентных структур над поверхностью. Согласованность этих двух методов в условиях сильной неоднородности ландшафта и при различных режимах атмосферной циркуляции над неоднородным ландшафтом может свидетельствовать о том, что именно динамика атмосферного пограничного слоя определяет теплообмен атмосферы с подстилающей поверхностью, а сама поверхность способна «подстраиваться» под текущие аэродинамические условия и принимать весь тепловой поток, сформировавшийся в приземном слое.

Научная новизна работы:

В работе получены результаты измерений структуры атмосферной турбулентности в условиях неоднородного ландшафта, позволяющие одновременно исследовать пространственное распределение турбулентных характеристик, радиационный баланс и поток тепла на поверхности почвы, профиль температуры в АПС, благодаря чему появляется возможность детального анализа энергообмена поверхности с атмосферой. Такой комплексный эксперимент был проведен впервые.

Новой является идея введения поправки, учитывающей гладкую топографическую неоднородность ландшафта в виде эмпирического базового масштаба длины. В отличие от других способов учета неоднородности, такой подход позволяет не менять сами универсальные функции теории подобия.

Впервые на данных натурных измерений показан механизм, при котором поток тепла, генерируемый в верхних и средних частях атмосферного пограничного слоя при адвекции теплого или холодного воздуха, переносится к поверхности за счет турбулентного переноса благодаря неоднородности подстилающей поверхности.

Идея параметризации турбулентных потоков через третьи моменты ранее использовалась для конвективного АПС, для которого характерны чередующиеся восходящие и нисходящие потоки. В данной работе впервые показано, что такая параметризация может быть справедлива и для устойчивого АПС в том случае, когда крупные вихри генерируются за счет взаимодействия набегающего потока с сильно неоднородным ландшафтом.

Научная и практическая значимость:

Современный прогноз погоды и оценки будущих изменений климата производятся на основе гидродинамических моделей атмосферы, нижним граничным условием для которых выступают потоки импульса, энергии и массы (аэрозолей, газовых примесей) с подстилающей поверхностью. Для расчёта турбулентных потоков используются параметризации, в основе которых лежат теоретические потоково-градиентные соотношения, разработанные и откалиброванные на данных измерений над однородной подстилающей поверхностью. Результаты, представленные в данной работе, могут быть использованы в моделях прогноза и климата, для поправки к параметризациям турбулентного обмена над неоднородными ландшафтами. Так, предложенное введение эмпирического масштаба длины в перспективе может быть использовано в моделях атмосферной циркуляции. Зная распределение эмпирического масштаба длины по поверхности Земли, либо задавая этот масштаб в соответствии с типами поверхностей наряду с параметром шероховатости z_0 , можно ввести соответствующую коррекцию при вычислении

приповерхностных турбулентных потоков в моделях атмосферной циркуляции.

Данные комплексных натуральных наблюдений, освещенные в работе, могут быть использованы для валидации результатов численного моделирования турбулентных течений в АПС.

Достоверность результатов диссертационной работы определяется:

1) Комплексной постановкой специализированных экспериментов, применением сертифицированной измерительной аппаратуры, контролем качества используемых экспериментальных данных, детальным анализом ошибок измерений и расчетов статистических моментов турбулентности.

2) Применением для интерпретации данных измерений фундаментальных уравнений баланса статистических моментов турбулентности, универсальных соотношений теории подобия приземного слоя.

3) Согласием полученных результатов с ранее опубликованными работами по теории АПС, данными лабораторных экспериментов и вихреразрешающего моделирования.

Личный вклад автора:

Все основные результаты, представленные в работе, получены автором лично. Автор принимал участие в организации и проведении всех представленных в диссертации полевых экспериментов. Вся обработка экспериментальных данных с учетом поправок и корректировок, формулировка и проверка гипотез о связях между статистическими моментами, были проведены автором лично.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы были доложены автором на всероссийских и международных конференциях. Материалы

диссертации были представлены в виде докладов на семинарах Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН и Научно-исследовательского вычислительного центра (НИВЦ) МГУ имени М.В. Ломоносова, на международном рабочем совещании «Новые подходы к измерениям и моделированию геофизической турбулентности» (Москва, 2019 г.), на международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2018 г.), на международной молодежной школе и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: “CITES-2017” (Таруса, Звенигород, 2017 г.), на международной конференции Carbon Cycle in Lake-Atmosphere Continuum – CarLAC (Петрозаводск, 2015 г.), Международной конференции РЕЕХ-2017 (Москва, 2017 г.), на ассамблеях AGU (2015) и EGU (2017, 2018).

Настоящая работа выполнялась в рамках госзаданий ИФА РАН и НИВЦ МГУ, а также грантов:

1) Тема госзадания АААА-А18-118021290151-3 (0129-2019-0001) - Разработка методов параметризации потоков импульса тепла и влаги у поверхности океана.

2) Тема госзадания АААА-А16-116020410091-9 - Вычислительно-информационные технологии для математического моделирования естественных и антропогенных изменений климата и природной среды.

3) Грант РНФ 17-17-01210 - Исследование процессов взаимодействия атмосферного пограничного слоя умеренных и высоких широт с деятельным слоем суши и водоёмами: разработка параметризаций для моделей Земной системы.

4) Грант РФФИ 20-05-00834 - Взаимодействие атмосферы с морем и сушей в прибрежной зоне: разработка методов расчета характеристик энергообмена.

5) Грант РФФИ 17-05-01221 - Исследование атмосферного пограничного слоя в Арктике по данным специализированных измерений на Российских полярных станциях.

6) Грант РФФИ 16-05-01094 - Моделирование стратифицированных геофизических турбулентных течений над неоднородными поверхностями при помощи DNS, RANS и LES-методов.

Публикации:

По теме диссертации опубликованы 9 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления основных результатов диссертации, а также получено 1 свидетельство о регистрации базы данных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка основных работ автора по теме диссертации и списка использованной литературы, включающего 151 название. Объем диссертации составляет 119 страниц, включая 21 рисунок.

Во введении изложена актуальность работы, объект и предмет исследования, цели и задачи, исходные данные, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость, достоверность результатов, апробация работы и личный вклад автора.

В Главе 1 приведены характеристики исследуемых подстилающих поверхностей и обзор современных методов экспериментального изучения энергообмена атмосферы с подстилающей поверхностью.

В разделе 1.1 выделяется два типа ландшафта. Первый тип характеризуется равномерным распределением элементов шероховатости, огибающая кривая которых имеет непрерывную производную (например, холмистая поверхность, покрытая лесом). Далее в работе такой ландшафт

называется *ландшафтом с гладкой топографической неоднородностью*. Второй тип характеризуется неравномерным распределением элементов шероховатости, составляющие его участки отличаются различными значениями альбедо, теплоемкости, при этом огибающая функция имеет разрывы или разрывы производной. Далее в работе такой ландшафт именуется *ландшафтом с разрывной топографической неоднородностью*. В качестве примера можно привести следующие неоднородные поверхности: замкнутые пространства, окруженные территорией со значительно более высокими элементами шероховатости: городские площади, поляны в лесу, озера; ступенчатое изменение высоты подстилающей поверхности: лесные опушки, прибрежный рельеф; узкие продолжительные «туннели»: городские, речные и горные каньоны;

Приведен обзор литературы, посвященной исследованиям приземного слоя над каждым из этих типов ландшафта.

Далее в Главе 1 рассмотрены основные методы экспериментального изучения энергообмена атмосферы с АПС: метод турбулентных пульсаций (ковариации пульсаций или Eddy-covariance (EC) в англоязычной литературе), потоково-градиентный метод, основанный на ТПМО и метод теплового баланса.

Раздел 1.2. посвящен методу турбулентных пульсаций. В общем случае турбулентный поток F величины s может быть вычислен как

$$F = \underbrace{\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{s}}_I + \underbrace{\bar{\rho}'_a \bar{w} \bar{s}}_{II} + \underbrace{\bar{\rho}_a \bar{w}' \bar{s}}_{III} + \underbrace{\bar{\rho}'_a \bar{w}' \bar{s}}_{IV} + \underbrace{\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{s}'}_V + \underbrace{\bar{\rho}'_a \bar{w} \bar{s}'}_{VI} + \underbrace{\bar{\rho}_a \bar{w}' \bar{s}'}_{VII} + \underbrace{\bar{\rho}'_a \bar{w}' \bar{s}'}_{VIII}, \quad (1)$$

где ρ_a – плотность воздуха, w – вертикальная составляющая скорости, s – удельное содержание рассматриваемого скаляра. Турбулентные потоки явного тепла H , скрытого тепла $L_s E$ и импульса τ определяются формулами:

$$H = c_p \bar{\rho}_a \overline{w' T'}, \quad (2)$$

$$L_s E = L_s \bar{\rho}_a \overline{w' q'}, \quad (3)$$

$$\tau = \bar{\rho}_a [\overline{w'u'^2} + \overline{w'v'^2}]^{1/2}, \quad (4)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха, u и v – продольная и поперечная среднему потоку составляющие скорости, T – температура воздуха, L_s – удельная теплота парообразования воды, q – удельная влажность воздуха. Уравнения (2)-(4) получены из (1), исходя из следующих допущений и предположений: осреднения удовлетворяют условиям Рейнольдса, средняя вертикальная скорость \bar{w} равна нулю, флуктуации плотности воздуха ρ'_a пренебрежимо малы по сравнению со средней плотностью $\bar{\rho}_a$. В условиях однородного ландшафта вводятся специальные критерии отбора данных, по которым отбираются только те данные, для которых перечисленные предположения справедливы. Однако некоторые из этих предположений могут не выполняться над неоднородным ландшафтом, что требует учета различных слагаемых уравнения (1) при расчете турбулентных потоков и усложняет отбор данных по стандартным критериям. Кроме того, измеренные величины нуждаются в коррекциях, связанных с особенностями измерений и обработки данных: спектральная коррекция, коррекция акустической температуры, WPL-коррекция, удаление пиков в данных, коррекция наклона осей анемометра.

Раздел 1.3. посвящен потоково-градиентному методу. Градиенты средней горизонтальной скорости ветра \bar{U} , температуры \bar{T} и влажности \bar{q} могут быть выражены через безразмерные градиенты метеовеличин $\phi(\zeta)$ следующим образом

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} \phi_m(\zeta), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \frac{T_*}{\kappa z} \phi_h(\zeta), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = \frac{q_*}{\kappa z} \phi_v(\zeta), \quad (7)$$

где u_* , T_* , q_* – масштабы скорости (скорость трения), температуры и влажности соответственно, $\kappa = 0.4$ – постоянная Кармана, $\zeta = \frac{z}{L}$ – параметр

устойчивости, где z – высота над поверхностью, L – масштаб длины Обухова, определяемый как $L = \frac{\bar{T} u_*^2}{kg T_*}$.

Безразмерный градиент соответствующих метеовеличин зависит от устойчивости атмосферы и может быть выражен через параметр устойчивости как

$$\phi_m(\zeta) = \begin{cases} 1 + C_m \zeta, & \text{при } \zeta \geq 0 \\ (1 - C'_m \zeta)^{-1/4}, & \text{при } \zeta < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi_{h,v}(\zeta) = \begin{cases} 1 + C_{h,v} \zeta, & \text{при } \zeta \geq 0 \\ (1 - C'_{h,v} \zeta)^{-1/2}, & \text{при } \zeta < 0 \end{cases} \quad (9)$$

где $C_m=5$, $C'_m=15$, $C_{h,v}=6$, $C'_{h,v}=9$ – коэффициенты, определенные эмпирически. Таким образом, при известных функциях безразмерного градиента, достаточно измерений средних метеовеличин на двух различных уровнях для вычисления масштабов скорости, температуры или влажности. При этом турбулентные потоки связаны с соответствующими масштабами соотношениями:

$$\tau = \rho_0 u_*^2, \quad (10)$$

$$H = -c_p \rho_0 u_* T_*, \quad (11)$$

$$L_s E = -\rho_0 L_s u_* q_*. \quad (12)$$

При наличии крупных элементов шероховатости (в частности, над лесной растительностью или городской поверхностью) вводится параметр длины D – высота вытеснения, и потоково-градиентное соотношение в устойчивом АПС преобразуется к виду:

$$\phi_m(\xi) = \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \frac{\kappa(z-D)}{u_*} \approx a + C_m \xi, \quad \xi = \frac{(z-D)}{L}, \quad (13)$$

где $a = const \approx 1$.

Раздел 1.4. посвящен методу теплового баланса и основным положениям, лежащим в его основе. Рассмотрена проблема незамыкания теплового баланса, согласно которой в большинстве экспериментов

суммарная энергия солнечного, атмосферного излучения и потоков тепла через поверхность (лед, снег или поверхность почвы) оказывается больше энергии, уносимой турбулентными потоками явного и скрытого тепла, полученными из пульсационных измерений.

Глава 2 посвящена особенностям АПС над ландшафтом с гладкой топографической неоднородностью на примере квазиоднородного леса в холмистой местности в зимний период. Приведены результаты обработки данных многоуровневых турбулентных измерений над лесом на 127-метровой метеорологической мачте, расположенной на исследовательской станции *SMEAR II* (Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations) Университета Хельсинки (Хьютиала, Финляндия, 24°17'13" в.д., 61°51'5" с.ш.) в период с 5 ноября 2015 г. по 3 марта 2016 г.

Анализ измерений при нейтральной стратификации показал, что аппроксимация турбулентного масштаба длины линейной зависимостью от высоты с заданной высотой вытеснения является грубым приближением. Показано, что зависимость безразмерного градиента средней скорости ветра ϕ_m от параметра устойчивости ξ не является универсальной линейной функцией $\phi_m(\xi) = a + b\xi$, и для разных уровней измерений значения a и b могут существенно отличаться от ожидаемых из ТПМО значений $a = 1$ и $b = C_m = 5$ (рис.1 а,б,в).

Предложен эмпирический базовый масштаб длины l_t^b , в предположении, что в установившемся турбулентном потоке масштаб турбулентности зависит исключительно от геометрии области, в которой происходит течение, и не зависит от динамики самого течения. Тогда растительность и рельеф задают уникальную геометрию, определяющую базовый масштаб длины при нейтральной стратификации $l_t^b = \langle \frac{u_*}{\kappa \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}} \rangle$, где скобками обозначено осреднение по выборке данных с нейтральной

стратификацией. Показано, что эмпирический масштаб l_t^b существенно отличается от величины $(z - D)$, традиционно принимаемой в качестве масштаба турбулентности при нейтральной стратификации. При нормировке на новый масштаб модифицированный безразмерный градиент скорости в приземном слое над лесом $\phi'_m(\xi') = \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \kappa \frac{l_t^b}{u_*}$ может быть приближен линейной функцией $\phi'_m(\xi') \approx 1 + C'_m \xi'$ с тем же самым значением коэффициента $C'_m = C_m \approx 5$ в широком диапазоне значений нового параметра устойчивости $\xi' = \frac{l_t^b}{\Lambda}$, т.е. вид функции совпадает с видом этой функции над однородной поверхностью с малыми элементами шероховатости, кроме уровня $z = 125$ м, где $b_k \approx 3 < 5$ из-за близости верхней границы АПС, где локальное масштабирование не является оправданным ввиду наличия крупных вихрей.

Предположено, что в верхней части АПС существенное значение имеет нелокальный перенос импульса крупными вихрями. На основании этого была предложена и проверена полуэмпирическая параметризация потоково-градиентного соотношения, учитывающая влияние топографии, свойств слоя растительности и высоты АПС. Для этого был введен масштаб турбулентности путем интерполяции разных масштабов длины $l_t^{mix} = \left(C_1 \frac{1}{l_t^g} + C_2 \frac{1}{l_t^s} \right)^{-1} = \frac{C l_t^g l_t^s}{l_t^g + (C-1) l_t^s}$, где $l_t^g = \frac{l_t^b (1-\sigma)^{3/4}}{1 + C_m l_t^b / L}$ – масштаб, связанный с потоками на поверхности, он включает в себя поправку на влияние топографии и слоя растительности и отвечает за крупные вихри размеров, сравнимых с высотой z , $l_t^s = \frac{l_t^b (1-\sigma)^{3/4}}{1 + (1-\sigma)^{-1/2} C_m l_t^b / L}$ – масштаб, учитывающий локальные значения потоков плавучести и импульса, он связан с мелкомасштабной сдвиговой турбулентностью, сгенерированной на высоте измерений, и включает также поправку, связанную с уникальной структурой ландшафта. Здесь $\sigma = \frac{z - z_1}{h_{\text{АПС}} - z_1}$ – безразмерная высота, $h_{\text{АПС}}$ – высота АПС, L

– масштаб Обухова вблизи поверхности. Константа $C = 5$ была получена по данным LES моделирования¹.

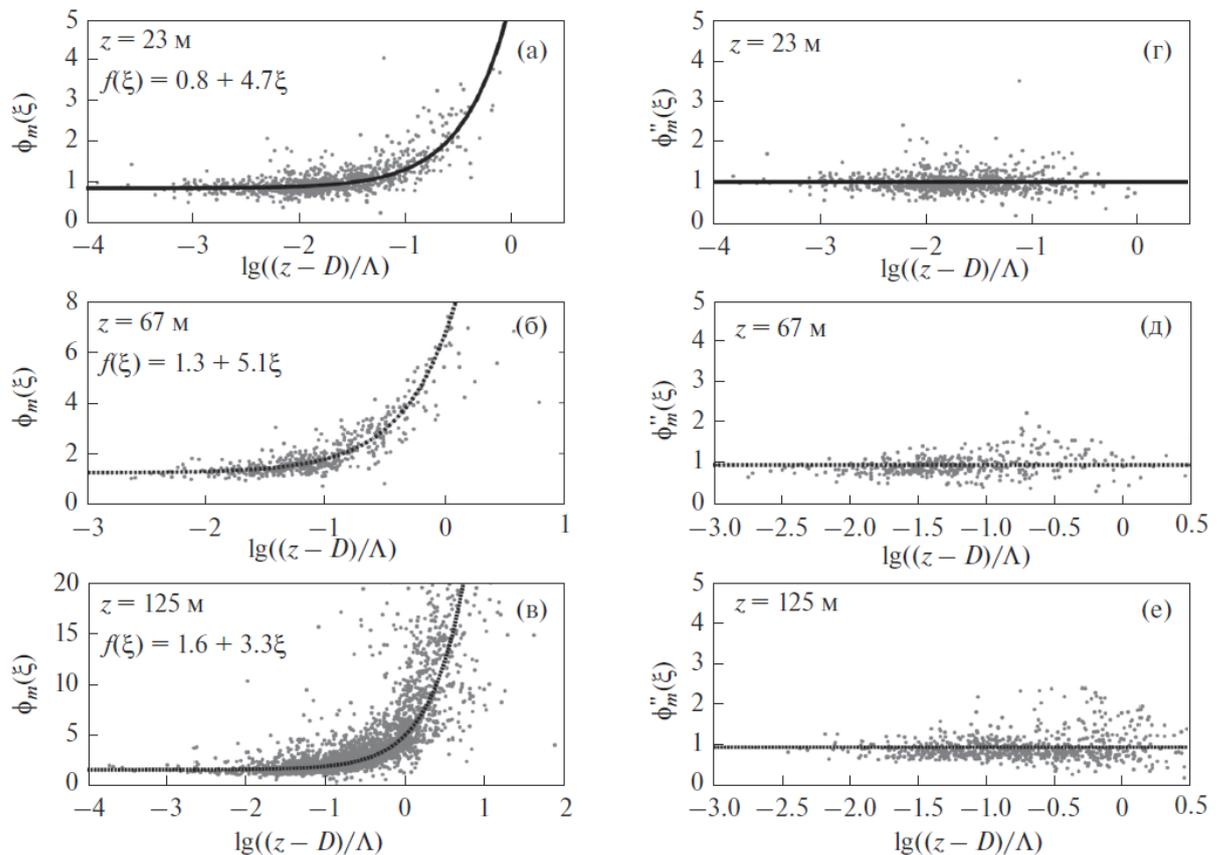


Рисунок 1 (а, б, в) - безразмерный градиент скорости ϕ_m , в нормировке на стандартный масштаб длины $\xi = (z - D)/\Lambda$ на разных уровнях. Точки - данные наблюдений; кривые - линейные функции $f_k(\xi) = a_k + b_k \xi$, найденные методом наименьших квадратов. **(г, д, е)** - градиент скорости, нормированный на масштаб длины l_t^{mix} : $\phi_m'' = \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \kappa \frac{l_t^{mix}}{u_*}$. Точки - данные наблюдений. Прямые - средние значения ϕ_m'' для данного уровня.

Обезразмеренные градиенты $\phi_m''(\xi') = \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \kappa \frac{l_t^{mix}}{u_*}$, вычисленные по данным измерений с применением нормировки на масштаб l_t^{mix} изображены на Рис. 1г - 1е. Для всех измерительных уровней значения этой функции лежат в окрестности прямых $\phi_m'' \approx const \approx 1$. Средние значения ϕ_m'' указаны на рисунках прямыми, параллельными оси абсцисс. Помимо

¹Глазунов А. В. (2014) Численное моделирование устойчиво-стратифицированных турбулентных течений над плоской и городской поверхностями. Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50. – №. 3. – С. 271-271.

приведения безразмерного градиента скорости к универсальному виду, описанный способ обезразмеривания уменьшает разброс точек по вертикали, то есть снижает неопределенность вычисления градиента при заданном значении ξ' за счет учета зависимости от высоты АПС.

Глава 3 посвящена особенностям АПС над ландшафтом с разрывной топографической неоднородностью на примере озер, полностью или частично окруженных лесом. Представлены результаты специализированных комплексных экспериментов, проводимых Институтом физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН совместно с Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова (Географический факультет и Научно-исследовательский вычислительный центр) в прибрежной зоне Белого моря в период 2015-2018 гг.

Раздел 3.1. посвящен описанию районов измерений и характеристик приборов.

В разделе 3.2. описаны методы обработки данных и оценка точности полученных результатов.

В разделе 3.3. сравниваются результаты вычисления турбулентных потоков методом теплового баланса и методом ковариации пульсаций. Два ряда измерений для озера Кисло-Сладкое (2017 г.) представлены на Рис. 2. Результаты определения потоков по двум методам хорошо согласуются между собой, коэффициент корреляции равен 0.6. При этом метод турбулентных пульсаций занижает абсолютные значения потоков в сравнении с балансовым методом, в согласии с литературными данными. Наиболее вероятной причиной такого занижения является перенос тепла вторичной циркуляцией, индуцированной на границе лес-озеро, по типу вихря с горизонтальной осью за обратной ступенькой.

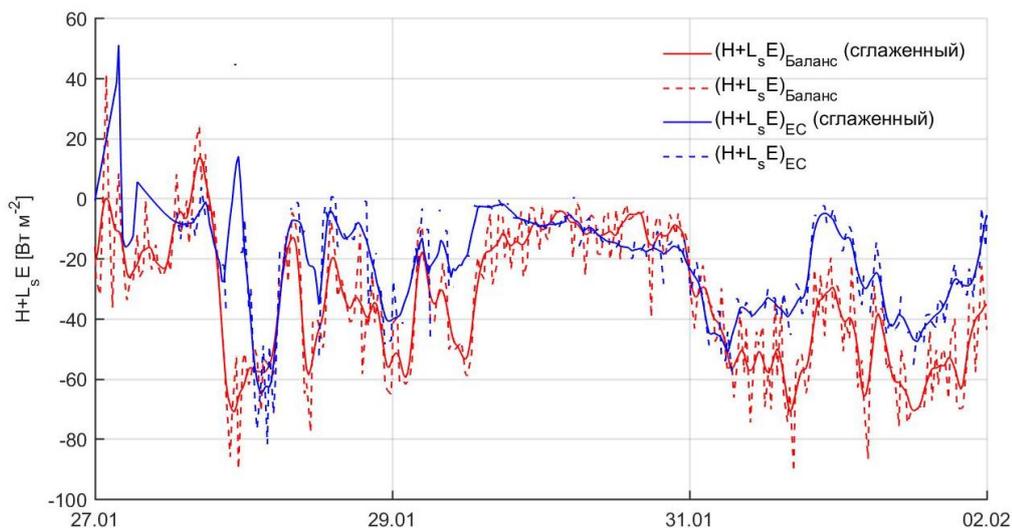


Рисунок 2 - Суммарный поток тепла (явного и скрытого) согласно измерениям методом турбулентных пульсаций (ЕС) и балансовым расчетам. Окно осреднения для скользящего среднего составляет 3 часа.

В разделе 3.4. анализируются временные ряды измеренных метеовеличин на озере Кисло-Сладкое (2017 год), которое частично окружено лесным массивом, а также с двух сторон имеет соединение с гладкой и квазиоднородной поверхностью покрытого льдом залива. Показано, что можно выделить два режима формирования потока тепла (отмечены красной и зеленой стрелками на Рис.3г.).

Первый режим (красная стрелка) связан с течением со стороны лесного массива (см. направление ветра на Рис 3в, 4а) и со сдвигом скорости ветра при срыве потока на высоте верхушек деревьев. Если при этом в пограничном слое выше происходит адвекция теплого воздуха (Рис.3а), турбулентный поток $\overline{w'w'T'}$ переносит к поверхности отрицательный поток тепла (Рис.3г, пунктир). ТПМО не может воспроизвести этот механизм, и её результаты не согласуются с измерениями теплового потока методом ковариации пульсаций (Рис.3г, сплошные линии).

Второй режим (зеленые стрелки на Рис.3г) связан с течением со стороны коридора, соединяющего озеро с поверхностью залива (см. направление ветра на Рис 3в, 4а). Поток явного тепла при таком режиме не так сильно связан с процессами на средних и верхних уровнях пограничного

слоя и скорее определяется приповерхностной скоростью ветра и разницей температуры между поверхностью и приповерхностным слоем атмосферы. Поток потока явного тепла $\overline{w'w'T'}$ становится незначительным, и расчеты на основе ТПМО хорошо коррелируют с методом ковариации пульсаций.

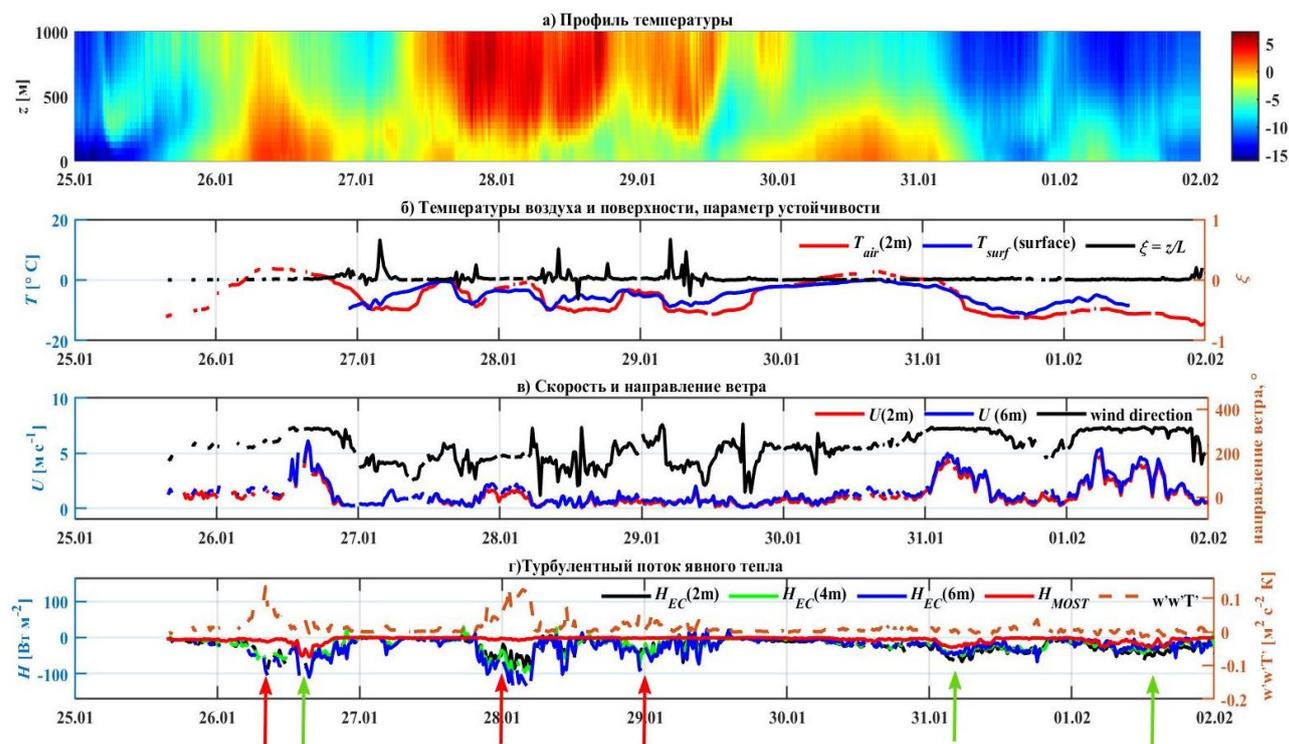


Рисунок 3 - Временные ряды измеряемых метеовеличин и измеренных и рассчитанных потоков явного тепла на озере Кисло-Сладкое (2017 г.)

Показано, что вклад в поток явного тепла от крупных вихрей H_{CS} , образующихся при срыве потока на высоте верхушек деревьев, может быть оценен через третий момент $\overline{w'w'T'}$ и коэффициент асимметрии вертикальной скорости S_w как

$$H_{CS} = -c_p \bar{\rho}_a \frac{\overline{w'w'T'}}{S_w (\overline{w'^2})^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

по аналогии с моделями массового потока mass-flux² и бимодальной модели bottom-up-top-down³ в конвективном АПС.

Связь потоков, измеренных методом ковариации пульсаций и оцененных с помощью ТПМО и с помощью уравнения (14), представлена на Рис. 4. Когда основной поток направлен со стороны лесного массива (Рис.4б) угловой коэффициент линейной регрессионной связи H_{MOST} и H_{EC} равен 0.04, т.е. ТПМО практически не воспроизводит реальных значений потоков. Возрастание абсолютного значения H_{EC} сопровождается возрастанием третьего момента $\overline{w'w'T'}$ (цвет точек меняется от синего к красному, $\overline{w'w'T'}$ возрастает от близких к нулю значений до $0.12 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2} \text{ К}$), и параметризованный поток H_{CS} значительно возрастает с угловым коэффициентом 2.86 (черные точки). При этом наблюдается хорошая корреляция измеренных потоков H_{EC} и параметризованных H_{CS} : коэффициент детерминированности $r^2 = 0.7$. Когда основной поток направлен со стороны северного коридора (Рис.4в) градиентный метод значительно лучше воспроизводит измеренные потоки, хотя и занижает их значение: угловой коэффициент между H_{MOST} и H_{EC} составляет 0.29 (по сравнению с 0.04 в первом случае). При этом возрастание потока не сопровождается возрастанием третьего момента $\overline{w'w'T'}$ (цвет точек остается синим даже при больших потоках, $\overline{w'w'T'}$ не превышает $0.02 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2} \text{ К}$), и параметризованный поток H_{CS} существенно хуже согласуется с измеренным потоком: H_{CS} положительный или близкий к нулю в интервале значений реальных потоков $-50 \text{ Вт м}^{-2} < H_{EC} < 0$. Коэффициент детерминированности $r^2 = 0.16$, т.е. параметризованный поток существенно хуже согласуется с

² Abdella K and McFarlane N (1997). A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer. J. Atmos. Sci., 54, 1850–1867.

³ Zilitinkevich S, Gryanik V M, Lykossov V N and Mironov D V (1999). Third-Order Transport and Nonlocal Turbulence Closures for Convective Boundary Layers. J. Atmos. Sci., 56, 3463–3477

измеренным, и вклад когерентных структур в общий поток при таком сценарии существенно меньше.

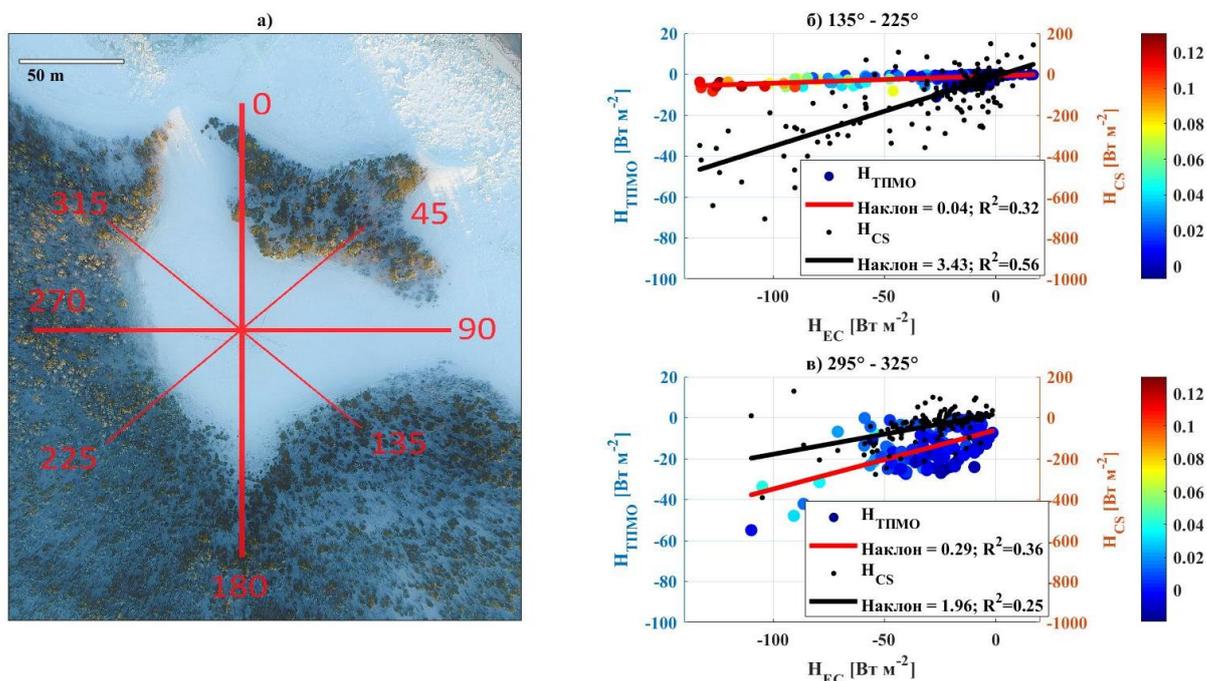


Рисунок 4 – Озеро Кисло-Сладкое с указанием направлений ветра (а). Диаграмма рассеяния потока тепла, рассчитанного по ТПМО (H_{MOST} (цветные точки)) и по формуле (12) (H_{CS} (черные точки)) относительно измеренного потока H_{EC} в двух режимах турбулентности над озером: основной поток направлен со стороны лесного массива (б) и со стороны северного коридора (в). Цветом обозначен третий момент $\overline{w'w'T'}$.

В разделе 3.5. рассматривается пространственное распределение потока импульса. Показано, что турбулентный поток импульса над оз. Кисло-Сладкое увеличивается по модулю с высотой, при этом экстраполяция потока на поверхность дает значения близкие к нулю (Рис.5), что подтверждается результатами вихреразрешающего моделирования⁴.

⁴ Глазунов А.В., Степаненко В.М. (2015) Вихреразрешающее моделирование стратифицированных турбулентных течений над неоднородными ландшафтами // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 4. С. 1–13

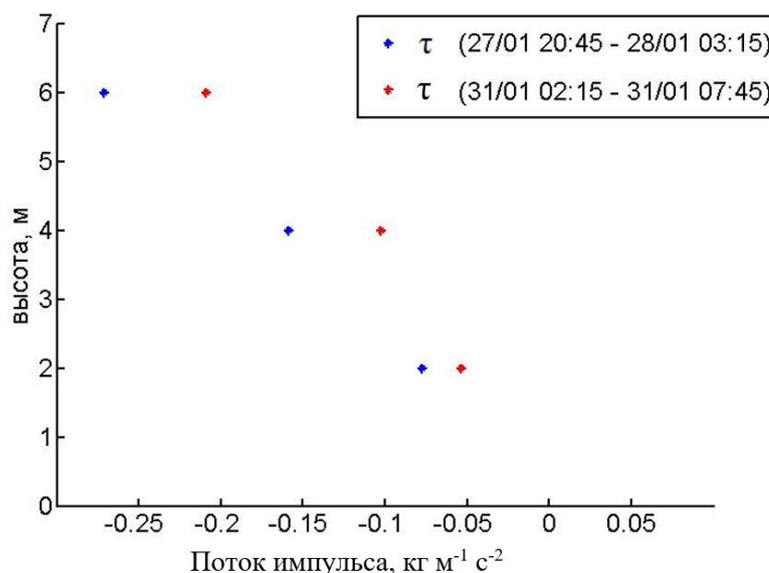


Рисунок 5 – Вертикальное распределение турбулентного потока импульса.

В заключении представлены основные результаты исследования:

1) Экспериментально исследована структура атмосферного пограничного слоя над неоднородной поверхностью.

2) Выявлено влияние гладкой топографической неоднородности на турбулентные потоки. Введена коррекция универсальных функций для такого ландшафта с помощью введения эмпирического базового масштаба длины, зависящего от индивидуальных особенностей топографии и типа подстилающей поверхности в месте измерений. Использование нового эмпирического масштаба позволяет ввести коррекцию универсальных функций ТПМО в устойчиво-стратифицированном приземном слое без их существенной модификации по сравнению с универсальными функциями над однородными поверхностями с малыми элементами шероховатости.

3) Изучено влияние разрывной топографической неоднородности на турбулентные потоки. Показано, что формирование потока тепла над сильно неоднородным ландшафтом может определяться крупными вихрями, образующимися в течении за уступом при срыве потока. Эти структуры обеспечивают турбулентный перенос потока тепла, связанного с адвекцией теплого или холодного воздуха и генерируемого в средних слоях атмосферного пограничного слоя, а не на поверхности.

4) Исследованы условия применимости тех или иных методов расчета потоков тепла, влаги и импульса для неоднородного ландшафта. Показано, что турбулентные потоки, определенные методом теплового баланса, могут согласовываться с потоками, измеренными напрямую методом ковариации пульсаций, даже в условиях сильной неоднородности.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Barskov K., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Gavrikov A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // *Boundary-Layer Meteorology*. 2019. Vol. 173, no. 3. P. 311–320. DOI: 10.1007/s10546-019-00469-w.
2. Глазунов А.В., Мортиков Е.В., Барсков К.В., Каданцев Е.В., Зилитинкевич С.С. Слоистая структура устойчиво стратифицированных турбулентных течений со сдвигом скорости // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 4. С. 13–26. DOI: 10.31857/S0002-351555413-26. (Glazunov A.V., Mortikov E.V., Barskov K.V., Kadantsev E.V., Zilitinkevich S.S. Layered structure of stably stratified turbulent shear flows // *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. Vol. 55, no. 4. P. 312–323. DOI: 10.1134/s0001433819040042)
3. Барсков К.В., Глазунов А.В., Репина И.А., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Маммарелла И. О применимости теории подобия для устойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над поверхностями сложной структуры // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 5. С. 544–555. DOI: 10.1134/S0002351518050036. (Barskov K.V., Glazunov A.V., Repina I.A., Stepanenko V.M., Lykossov V.N., Mammarella I. On the Applicability of Similarity Theory for the Stable Atmospheric Boundary Layer over Complex Terrain. *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*. 2018. V.54. №5. P.462-

Статьи в сборниках:

1. Степаненко В.М., Репина И.А., Барсков К.В., Артамонов А.Ю., Богомолов В.Ю., Варенцов М.И., Гавриков А.В., Пашкин А.Д. Исследование структуры атмосферной турбулентности над неоднородным ландшафтом // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов. Физматкнига Москва, 2018. С. 81–93.
2. Barskov K.V., Chernyshev R.V., Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Yu, Guseva S.P., Gavrikov A.V. Experimental study of heat and momentum exchange between a forest lake and the atmosphere in winter // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 96, no. 1. P. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/96/1/012003.
3. Repina I.A., Stepanenko V.M., Artamonov A.Yu, Barskov K.V., Gavrikov A.V., Guseva S.P., Chernyshov R.V. Air-surface interaction over small lake in winter. report series in aerosol science // Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting / Ed. by H. Lappalainen. Vol. 201 of Report series in Aerosol Science. Helsinki, 2017. P. 421–423.

Тезисы докладов:

1. Repina I.A., Stepanenko V.M., Artamonov A. Yu., Barskov K.V., Chernyshev R.V., Gavrikov A.V, Pashkin A.D., Varentsov M.I. Experimental study of the atmospheric surface layer turbulent structure above inhomogeneous surface // EGU General Assembly Abstracts. Vol. 20 of Geophysical Research Abstracts. EGU, 2018. EGU2018-13278.
2. Степаненко В.М., Репина И.А., Барсков К.В., Артамонов А.Ю., Гавриков А.В., Пашкин А.Д., Варенцов М.И., Богомолов В.Ю. Исследование структуры атмосферной турбулентности в неоднородном ландшафте // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная

конференция, посвященная столетию со дня рождения академика А. М. Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Тезисы докладов. Физматкнига Москва, 2018. С. 32–32.

3. Барсков К.В., Глазунов А.В., Репина И.А., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Маммарелла И. О применимости теории подобия для устойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над поверхностями сложной структуры / К. В. Барсков, А. В. Глазунов, И. А. Репина и др. // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика А.М. Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Тезисы докладов. Физматкнига Москва, 2018. — С. 21–21.

Свидетельство о регистрации базы данных:

Репина И.А., Степаненко В.М., Барсков К.В. База экспериментальных данных о турбулентной структуре атмосферного пограничного слоя при различных фоновых условиях. Номер регистрации 2019620643, дата получения: 18 апреля 2019.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит своего научного руководителя Репину И.А., а также заведующего лабораторией суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов НИВЦ МГУ Степаненко В.М. за помощь в подготовке и написании данной работы, вдохновение, мотивацию и поддержку, ценные советы, идеи, замечания и совместные интеллектуальные поиски. Участников зимних экспедиций Артамонова А.Ю., Гаврикова А.В, Гусеву С.П. и Чернышева Р.В. за совместную организацию и проведение измерений. Глазунова А.В. за ценные идеи и замечания. Маммарелла И. за помощь в обработке и анализе данных. Автор также выражает огромную благодарность членам своей семьи за поддержку, любовь и терпение, без которых данная работа не смогла бы состояться.