

УДК 551.583:504.3.054(470.5)(045)

*Г.И. Шишкин, В.В. Гурьянов***ВЫСОТА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ И ТЕНДЕНЦИИ ЕЁ ИЗМЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА**

Планетарный пограничный слой, являющийся нижним турбулентным слоем атмосферы, привлекает внимание множества специалистов, изучающих качество атмосферного воздуха. Именно здесь аккумулируется значительная доля мелкодисперсной пыли, аэрозолей и других примесей. Авторами проведено исследование особенностей межсезонной изменчивости высоты пограничного слоя атмосферы и отождествлённой с ней высоты слоя перемешивания на территории Приволжского федерального округа (далее – ПФО) на основе данных реанализа ERA5 за период 1979–2021 гг. Были проанализированы различные факторы, обуславливающие данную изменчивость, такие как аспекты атмосферной циркуляции, радиационный нагрев подстилающей поверхности и орографические особенности исследуемой местности. Авторами наглядно представлена годовая динамика высоты пограничного слоя, а также изучена тенденция её изменчивости за исследуемый период времени. В данной связи были сделаны некоторые выводы о характере накопления и рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере на территории ПФО.

Ключевые слова: атмосфера, пограничный слой, слой перемешивания, загрязнение воздуха.

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-3-312-317

В ходе изучения структуры атмосферы различными исследователями был выделен так называемый слой перемешивания. Данный слой представляет неподдельный интерес для практикующих метеорологов, ведущих исследования и мониторинг загрязнения воздуха, так как способен удерживать значительную долю мелкодисперсной пыли, аэрозолей и других примесей. Эта область относится к планетарному пограничному слою атмосферы (далее – ПСА) и зачастую отождествляется с ним. Здесь под воздействием динамических факторов и радиационного нагрева, при учёте различных состояний атмосферной стратификации, происходит интенсивный турбулентный обмен и, как следствие, перемешивание воздушных масс. Известно, что верхняя граница ПСА в условиях неустойчивости будет совпадать с нижним пределом температурной инверсии, накрывающей слой конвекции; при устойчивой же стратификации – будет определяться уровнем, выше которого интенсивность турбулентности спадает до 5 % от её интенсивности у поверхности.

Мощность данного вертикального слоя способна варьироваться в диапазоне от нескольких десятков метров до нескольких километров и будет обуславливаться конкретным сезоном, временем суток, а также орографическими особенностями подстилающей поверхности [1; 2]. Мощность ПСА и отождествлённой с ней высоты слоя перемешивания (далее – ВСП) является одним из определяющих факторов качества атмосферного воздуха. При уменьшении ВСП сокращается объём атмосферы, в котором могут рассеиваться примеси. Согласно исследованиям, при прочих равных условиях, при ВСП < 1,5 км наблюдается устойчивый рост концентраций примесей [3].

Цель авторов состояла в изучении межсезонной изменчивости высоты ПСА на территории ПФО. Данное исследование позволило бы дать дополнительную оценку сезонной тенденции аккумуляции и рассеяния примесей в атмосфере региона.

Объект и методы исследования

Авторами была поставлена задача проанализировать особенности межсезонной изменчивости высоты пограничного слоя атмосферы на территории ПФО. Исходным материалом исследования послужили данные реанализа ERA5 по высоте ПСА в период с 1979 по 2021 гг. [4]. Выбор данных реанализа обусловлен отсутствием пропусков и неоднородностей в исходных рядах.

Результаты и их обсуждение

В ходе обработки исходных данных были построены следующие карты (рис. 1 а–г). Наглядно продемонстрирована динамика высоты пограничного слоя атмосферы в исследуемом регионе в раз-

личные сезоны года. В качестве наиболее показательных, выбраны центральные месяцы соответствующих сезонов.

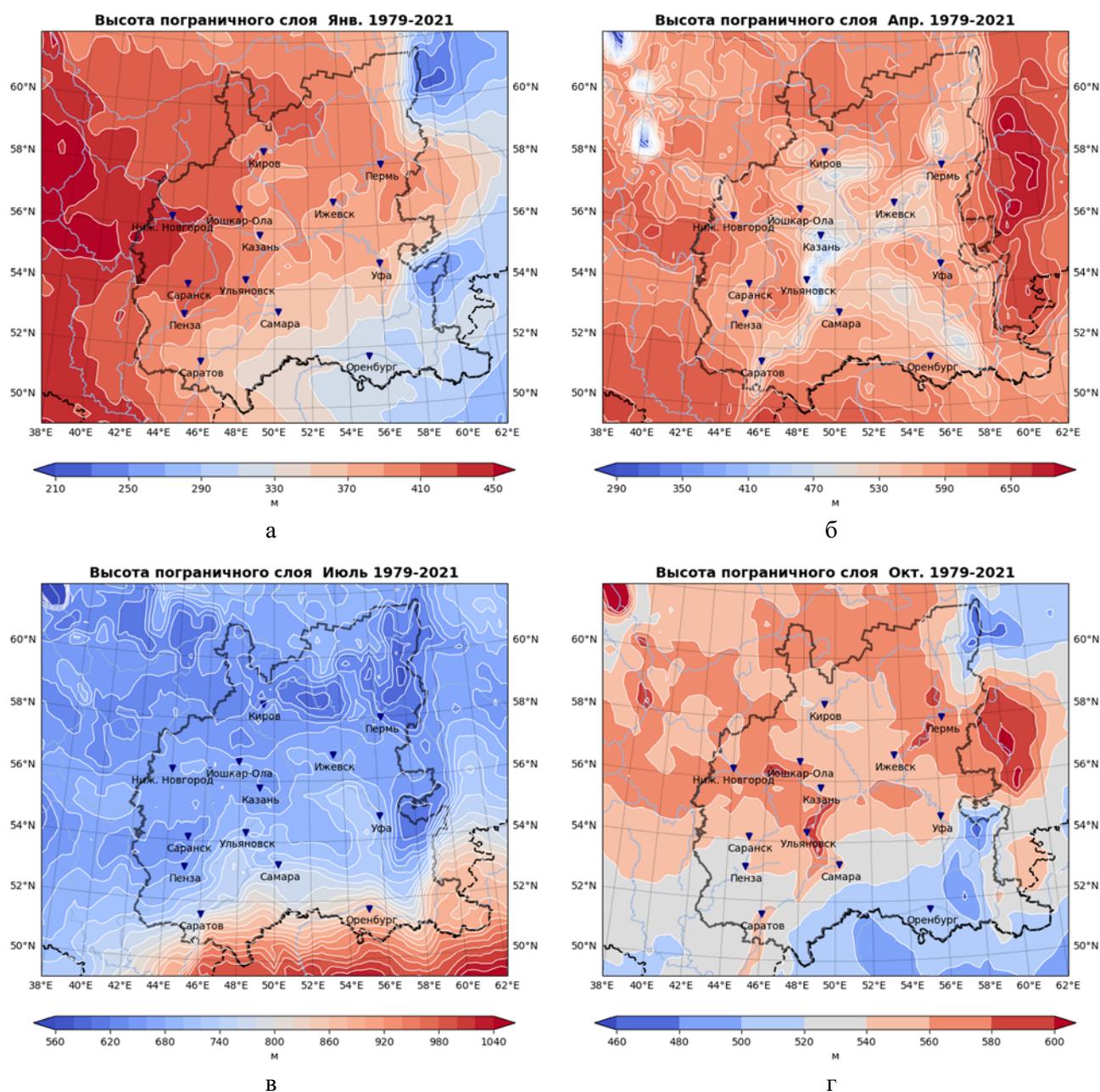


Рис. 1. Высота пограничного слоя атмосферы на территории ПФО в январе (а), апреле (б), июле (в), октябре (г) за период 1979–2021 гг.

Мощность пограничного слоя атмосферы за исследуемый период времени, как видно из рисунков, имеет характерные колебания.

Минимальные значения высоты ПСА наблюдаются в зимние месяцы и обусловлены растущим влиянием Азиатского центра действия атмосферы в это время года. Вследствие адвекции холодных воздушных масс и сильного выхолаживания материка, область повышенного давления распространяется с территории Сибири на запад и, охватывая Урал, достигает ПФО. Зональная циркуляция в регионе постепенно ослабевает, атмосферная стратификация обретает устойчивость. При этом в структуре ПСА закономерно образуются значительные по своей мощности задерживающие слои с областями температурных инверсий и изотермии, препятствующие генерации кинетической энергии турбулент-

ности. Интенсивность перемешивания воздушных масс и, как следствие, высота пограничного слоя атмосферы снижается до минимальных значений (≈ 200 м). В теплое время года синоптическая ситуация обратная. Доминирующее влияние на регион начинает оказывать макромасштабная циклоническая циркуляция. Конвекция достигает своего максимального развития в летние месяцы, что влечёт активное турбулентное перемешивание и увеличение высоты ПСА до пиковых значений (≈ 950 м).

Важно учитывать также и местные орографические условия. Так, южные и юго-восточные области ПФО, в силу их преимущественно равнинного ландшафта, оказываются наиболее подвержены вторжению холодных воздушных масс с востока в зимний сезон. Как следствие, здесь мы наблюдаем самую обширную область с минимальными значениями высоты ПСА. В летний сезон, также благодаря орографическим особенностям подстилающей поверхности, зональная атмосферная циркуляция наилучшим образом развивается именно в южных районах. Таким образом, годовая амплитуда высоты ПСА достигает наибольших значений в юго-восточных районах ПФО (≈ 700 м).

Кроме того, стоит отметить фактор радиационного нагрева подстилающей поверхности. Согласно рекомендациям [5], основанным на зондировании концентрации аэрозоля (как наилучшего индикатора динамических атмосферных процессов), слой перемешивания стоит разделить на внутренний и внешний. Динамика внутреннего слоя перемешивания представляется наиболее показательной в силу образующих его механизмов турбулентного теплообмена с подстилающей поверхностью. Благодаря содарным измерениям [6, с. 1157–1158] было выявлено, что высота данного слоя не превышает 500 м и имеет выраженную сезонную вариативность. В теплое время года высота внутреннего слоя перемешивания (далее – ВВСП) находилась в прямой пропорциональной зависимости от динамики среднемесячной температуры, что обуславливалось фактором радиационного прогрева подстилающей поверхности и являлось следствием усиления турбулентного теплообмена. В зимний сезон покрытая устойчивым снежным покровом поверхность не могла оказать существенного влияния на рост ВВСП. Анализируя динамику изменчивости ВВСП на территории ПФО, стоит учитывать географическую протяженность исследуемой территории. Радиационный прогрев подстилающей поверхности южных регионов ПФО, очевидно, вносит более существенный вклад в процессы турбулентного перемешивания, чем в северных областях, оказывая решительное воздействие на увеличение высоты ВВСП.

Далее, на основе данных реанализа ERA5 был вычислен параметр наклона высоты ПСА. Показатель КНЛТ для центральных месяцев сезонов года представлен на рис. 2 (а – г).

Исходя из рассчитанных показателей КНЛТ, можно сделать следующие выводы. На территории ПФО имеет место устойчивая тенденция изменения высоты ПСА, которая напрямую связана с подавляющим влиянием Азиатского центра действия атмосферы в холодное время года, что соответствует отрицательным значениям КНЛТ (с минимальными показателями в январе), и мощным влиянием макромасштабной циклонической циркуляции в тёплое время года, что соответствует положительным значениям КНЛТ (с максимальными показателями в июле). Таким образом, КНЛТ высоты ПСА подтверждает вышеописанный характер сезонной изменчивости высоты слоя перемешивания под влиянием динамических факторов и радиационного нагрева.

Выявление тенденций сезонной изменчивости высоты ПСА и отождествлённой с ней ВСП является важным подспорьем при работе с динамикой загрязнения атмосферы и проработкой нормативной экологической документации в этой области. Ранее, в исследовании высоты пограничного слоя атмосферы на территории России, авторами была подтверждена положительная корреляция высоты ПСА с разработанными учёными планами районирования территории по потенциалу загрязнения атмосферы (далее – ПЗА) и метеорологическому потенциалу её рассеивающей способности, обобщёнными А.Е. Морозовым в [3]. Так, территория, охватывающая восточную часть ЕТР и, в частности, ПФО, относилась к благоприятной зоне с «умеренным» показателем ПЗА (II по классификации Э.Ю. Безуглой), а также обладала «хорошими» условиями для рассеивания примесей (по классификации Т.С. Селегей). Отсюда можно сделать вывод, что характер изменений высоты ПСА будет справедливо являться маркером аккумуляции примесей в атмосферном воздухе, даже когда общей синоптической оценки ситуации будет недостаточно.

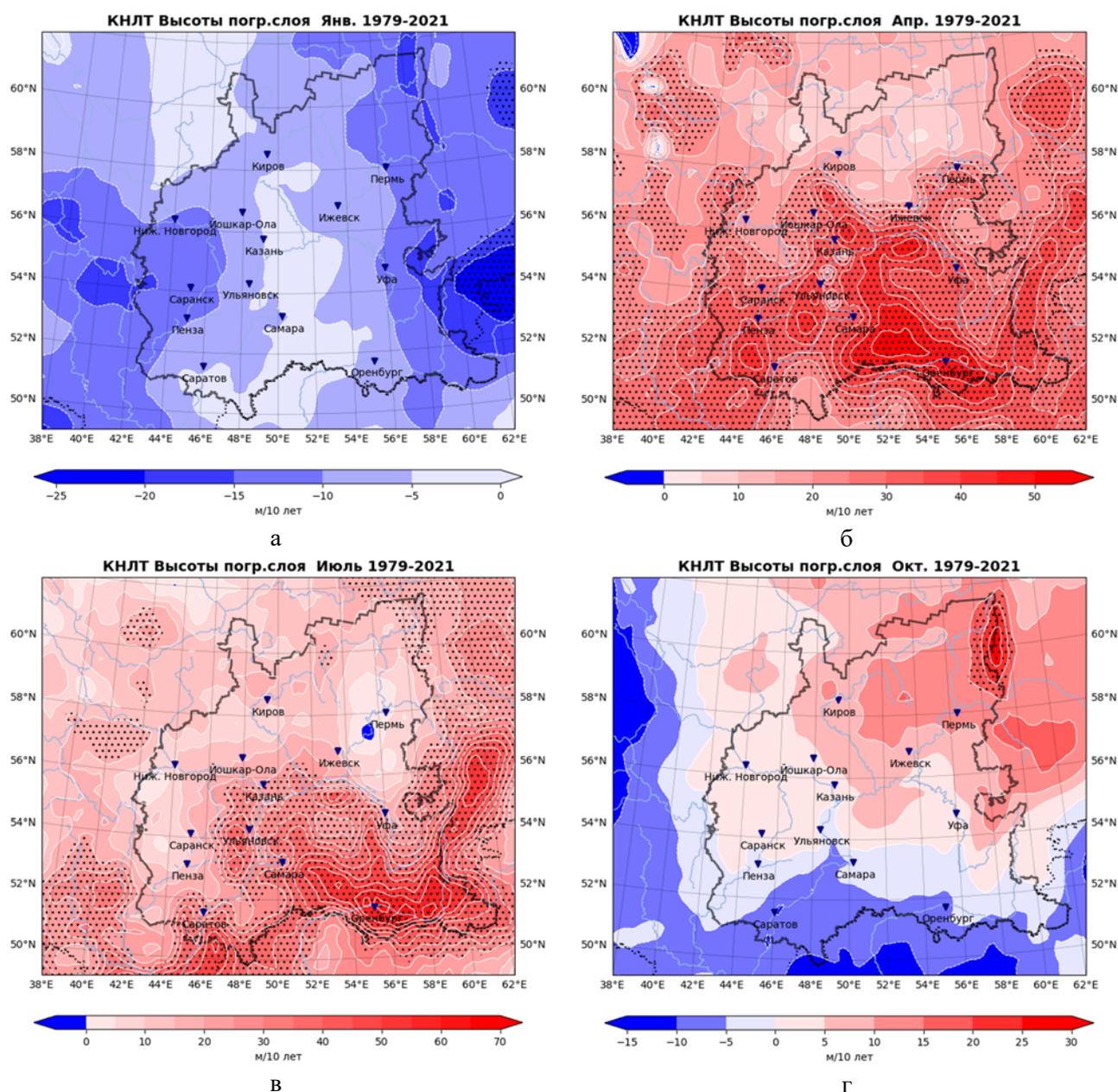


Рис. 2. Коэффициент наклона линейного тренда высоты ПСА на территории ПФО в январе (а), апреле (б), июле (в), октябре (г) за период 1979–2021 гг.

Выводы

Таким образом, в ходе анализа межсезонной изменчивости высоты ПСА и отождествлённой с ней ВСП на территории ПФО были проанализированы аспекты макромасштабной атмосферной циркуляции, фактора радиационного нагрева подстилающей поверхности и орографических особенностей местности.

Годовая амплитуда высоты пограничного слоя достигала наибольших значений в юго-восточных районах ПФО (≈ 700 м).

Рассчитанные показатели КНЛТ за исследуемый период времени подтверждают сделанные выводы о ярко выраженной сезонной изменчивости высоты ПСА с минимальными отрицательными значениями КНЛТ в январе и максимальными положительными значениями в июле, что, в свою очередь, служит маркером накопления примесей в холодный период года и их постепенного рассеяния в тёплый период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зилитинкевич С.С., Тюръяков С.А., Троицкая Ю.И., Мареев Е.А. Теоретические модели высоты пограничного слоя атмосферы и турбулентного вовлечения на его верхней границе // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 150–159.
2. Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Курьшина В.Ю., Агайар Е.В. Определение высоты пограничного слоя атмосферы по наземным метеорологическим наблюдениям // ScienceRise. 2016. Т. 7. № 1 (24). С. 6–10.
3. Морозов А.Е., Стародубцева Н.И. Метеорологические условия и загрязнение атмосферы. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2020. С. 65–73.
4. Метеорологические данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП). URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset&text=ERA5> (дата обращения: 18.03.2023).
5. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
6. Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Определение высоты внутреннего слоя перемешивания по измерениям содаров серии «Волна» // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 12. С. 1154–1159.

Поступила в редакцию 30.06.2023

Шишкин Георгий Игоревич, аспирант 2-го года обучения Института Экологии и Природопользования
E-mail: GeoIshishkin@kpfu.ru

Гурьянов Владимир Владимирович, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы
E-mail: vladimir.guryanov@kpfu.ru

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный университет»
420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, д. 5

G.I. Shishkin, V.V. Guryanov

**THE HEIGHT OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER AND TRENDS OF ITS CHANGES
IN THE TERRITORY OF THE VOLGA FEDERAL DISTRICT**

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-3-312-317

The planetary boundary layer, which is the lower turbulent layer of the atmosphere, attracts the attention of many specialists who study the quality of atmospheric air. A significant proportion of fine dust, aerosols and other impurities is accumulated here. The authors conducted a study of the features of the interseasonal variability of the height of the atmospheric boundary layer and the height of the mixing layer identified with it on the territory of the Volga Federal District based on ERA5 reanalysis data for the period 1979–2021. Various factors causing this variability were analyzed, such as: aspects of atmospheric circulation, radiative heating of the underlying surface and orographic features of the area under study. The authors clearly presented the annual dynamics of the boundary layer height, and also investigated the trend of its variability over the studied period of time. In this regard, some conclusions were made about the nature of the accumulation and dispersion of pollutants in the atmosphere in the Volga Federal District.

Keywords: Atmosphere, boundary layer, mixing layer, air pollution.

REFERENCES

1. Zilitinkevich S.S., Tyuryakov S.A., Troitskaya Yu.I., Mareev E.A. [Theoretical models of the height of the atmospheric boundary layer and turbulent entrainment at its upper boundary], in *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana* [*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*], 2012, vol. 48, no. 1, pp. 150–159 (in Russ.).
2. Stepanenko S.N., Voloshin V.G., Kuryshina V.Yu., Agayar E.V. [Calculation of the height of atmospheric boundary layer using surface meteorological observations], in *ScienceRise*, 2016, vol. 7, no. 1 (24), pp. 6–10 (in Russ.).
3. Morozov A.E., Starodubtseva N.I. *Meteorologicheskie usloviya i zagryaznenie atmosfery* [Meteorological conditions and air pollution], Ekaterinburg: Izd-vo UGLTU, 2020, pp. 65–73 (in Russ.).
4. *Meteorologicheskie dannye Evropeyskogo tsentra srednesrochnykh prognozov pogody (ETsSPP)* [Meteorological data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)], Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset&text=ERA5> (accessed: 18.03.2023).
5. Belan B.D. [Dynamics of the atmospheric mixing layer as it follows from data on aerosol], in *Optika atmosfery i okeana*, 1994, vol. 7, no. 8, pp. 1045–1054 (in Russ.).

6. Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V. [Determination of internal mixing layer height from "Volna" sodar measurements], in *Optika atmosfery i okeana*, 2009, vol. 22, no. 12, pp. 1154-1159 (in Russ.).

Received 30.06.2023

Shishkin G.I., 2nd year postgraduate student of the Institute of Ecology and Nature Management

E-mail: GeoIshishkin@kpfu.ru

Guryanov V.V., candidate of geographical sciences, Associate Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Atmospheric Ecology

E-mail: vladimir.guryanov@kpfu.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Tovarishcheskaya st., 5, Kazan, Russia, 420097