

## ПРИМЕНЕНИЕ СЕТИ ГНСС ДЛЯ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

**А.К. Кишкина<sup>1,3</sup>, Н.В. Шестаков<sup>1,2</sup>, И.А. Лисина<sup>1</sup>, Л.Н. Василевская<sup>1</sup>, А.Н. Бугаец<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

<sup>3</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

e-mail: kishkina.ako@dvfu.ru

**Аннотация.** В данном исследовании рассматривается возможность применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для целей мониторинга качества воздуха на основе данных о тропосферной зенитной задержке радиосигнала, связанной с влажностью в нижнем слое тропосферы и концентрацией твердых частиц размером до 2.5 (PM2.5) и до 10 (PM10) микрона, которые считаются основными показателями ухудшения качества воздуха согласно принятым международным стандартам. Используются данные трех базовых ГНСС-станций, расположенных на юге Приморского края. Рассмотрены три случая выхода на территорию Приморского края пыльных и песчаных бурь. В процессе постобработки результатов спутникового позиционирования определены зенитные тропосферные задержки (ZTD), в которых заключена информация о сконцентрированном в приземном слое атмосферы интегральном влагосодержании (IWV). Для выделения в структуре спутникового сигнала высокочастотной составляющей, соответствующей влиянию концентрации микрочастиц в атмосфере, использован метод главных компонент (principal component analysis – PCA). Выполнено сравнение изменения интегрального влагосодержания IWV и концентрации пылевых частиц в воздухе. Показано, что максимумы концентрации опасных твердых частиц в атмосфере согласуются с данными IWV. Обсуждаются перспективы использования ГНСС-технологий в системах мониторинга качества воздуха.

**Ключевые слова.** ГНСС, загрязнение воздуха, ZTD, пыль, водяной пар, IWV.

## APPLICATION OF A GNSS NETWORK FOR AIR QUALITY MONITORING IN PRIMORSKY KRAI

**A.K. Kishkina<sup>1,3</sup>, N.V. Shestakov<sup>1,2</sup>, I.A. Lisina<sup>1</sup>, L.N. Vasilevskaya<sup>1</sup>, L.N., Bugaets A.N.<sup>3</sup>**

*Far Eastern Federal University, 8 Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russian Federation*

*Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation*

*Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690041, Russian Federation*

e-mail: kishkina.ako@dvfu.ru

**Abstract.** This study investigates the potential of utilizing high-precision satellite geodetic equipment (GNSS) for air quality monitoring by analyzing signal delays associated with lower tropospheric moisture content and the concentration of particulate matter (PM2.5 and PM10), which are key air quality indicators per international standards. Data from three reference GNSS stations in southern Primorsky Krai were used to analyze three dust and sandstorm events affecting the region. Post-processing of satellite positioning data yielded zenith tropospheric delays (ZTD), providing insights into integrated water vapor (IWV) concentrated in the surface atmospheric layer. Principal component analysis (PCA) was employed to isolate the high-frequency GNSS signal component linked to atmospheric micro-particle concentrations. A comparison of IWV and dust particle concentration variations revealed that peak concentrations of hazardous particulate matter align with

IWV data. The potential for integrating GNSS technologies into air quality monitoring systems is discussed.

**Keywords.** *GNSS, air pollution, ZTD, dust, water vapor, IWV.*

**Введение.** Содержащиеся в атмосфере взвешенные твердые частицы размером до 2.5 (PM2.5) и до 10 (PM10) микрон по международным стандартам ВОЗ и согласно ГОСТ 70230-2022 являются наиболее опасными и токсичными загрязняющими воздух компонентами, так как при попадании в организм человека способны вызывать тяжелые респираторные, сердечно-сосудистые и онкологические заболевания. Изменения в состоянии атмосферы Приморского края, который характеризуется ярко выраженным муссонным климатом, что подразумевает сезонные изменения атмосферной циркуляции под влиянием термических контрастов между материком и океаном, с определенной периодичностью сопровождаются трансграничным переносом с территории Китая воздушных масс, которые содержат загрязняющие воздух опасные вещества, в том числе взвешенные твердые частицы PM2.5 и PM10, аэрозоли и антропогенные газы [6].

По этим причинам стабильный мониторинг концентрации частиц PM2.5 и PM10, а также мелкофракционной пыли и других загрязняющих элементов в атмосфере, является актуальной задачей метеорологии и экологии. В связи с тем, что наземные наблюдения за изменением концентрации опасных взвешенных частиц не репрезентативны в силу их точечной реализации и ограниченности только нижним слоем тропосферы, а также характеризуются низкой частотой дискретизации стандартных наблюдений, возникают трудности объективной и точной оценки качества воздуха.

Современный уровень развития ГНСС-технологий позволяет широко использовать их в фундаментальных и прикладных исследованиях в различных областях наук о Земле [1], в том числе активно развивается и ГНСС-метеорология [9]. Кроме того, современные исследования показывают перспективность применения спутниковых данных для мониторинга качества воздуха, связанного как с природными явлениями (например, пылевыми бурями и лесными пожарами), так и обусловленных промышленными выбросами вредных частиц [5, 8, 10, 12].

Ранее проведенные исследования показали, что результаты постобработки спутниковых данных, а именно значения зенитных тропосферных задержек (ZTD), содержат информацию о состоянии тропосферы. В первую очередь они отражают концентрацию интегрированного водяного пара (IWV) — параметра, чувствительного к изменениям в приземном слое атмосферы. Дополнительным фактором, влияющим на рефракцию радиоволн, выступают твердые взвешенные частицы размером 2.5 и 10 мкм (PM2.5, PM10), а также различные аэрозоли, включая пыль. Взаимодействие сигнала с этими частицами способно изменять величину тропосферной задержки, что, в свою очередь, сказывается на точности спутникового позиционирования.

В настоящей работе выполняется сравнение изменения определенного на основе результатов ГНСС-наблюдений с трех базовых станций интегрального влагосодержания IWV и концентрации пылевых и взвешенных твердых частиц PM2.5 в атмосфере над территорией юга Приморского края с 2019 по 2021 годы.

**Материалы и методы исследования.** Для целей моделирования и последующей оценки тропосферной задержки спутниковых сигналов (ZTD) принято разделять тропосферу на два основных слоя: верхний (ZHD, сухой, или гидростатический) и нижний (ZWD, влажный) [9, 11]. Гидростатическая составляющая общей тропосферной задержки составляет приблизительно 90% от её общего значения и характеризуется относительной простотой определения. Это обусловлено медленными пространственно-временными вариациями данной компоненты, а её величина главным образом зависит от трех факторов: атмосферного

давления на уровне земной поверхности, а также широты и высоты пункта наблюдений относительно уровня моря.

Моделирование влажной компоненты тропосферы представляет собой значительно более сложную задачу. Это объясняется тем, что ZWD непосредственно связана с изменчивым распределением и концентрацией водяного пара в атмосфере, которые подвержены интенсивным и быстрым флуктуациям. Оценка влажной составляющей производится косвенным путем, как разность между полной зенитной тропосферной задержкой и гидростатической ее составляющей. Детальное описание алгоритма определения интегрального влагосодержания тропосферы представлено в работах [4, 7].

В качестве объектов исследования были выбраны базовые ГНСС-станции, установленные в городах Владивосток (ГНСС-пункты VLAD и DVGU) и Находка (NKHD), расположение пунктов представлено на рис. 1. Владивосток, являясь административным центром Дальневосточного федерального округа, имеет население порядка 600 тысяч человек. В городской черте сосредоточены крупный порт, многочисленные промышленные предприятия и густая транспортная сеть. Морские суда в портовых городах выступают существенным источником эмиссии загрязняющих веществ, вносящих значительный вклад в общую массовую концентрацию аэрозольных частиц в атмосфере. Кроме того, Владивосток обладает статусом самого автомобилизированного города России, где выхлопные газы автотранспорта являются главным источником опасных взвешенных частиц. В Находке функционируют пять морских терминалов, специализирующихся на открытой перевалке угля различных марок. Образующаяся при добыче, транспортировке и переработке угольная пыль представляет собой один из наиболее агрессивных атмосферных поллютантов, способствующих развитию широкого спектра респираторных заболеваний [2, 8].

Так как радиосигнал, поступающий от спутника до наземного приемника, не может напрямую взаимодействовать с твердыми частицами и капельной влагой, судить о степени взаимодействия извлекаемого из данных спутниковых наблюдений содержания атмосферного водяного пара (IWV) со взвешенными твердыми частицами можно лишь по косвенным признакам. Кроме того, речь идет об объектах, размерность которых исчисляется микрометрами, поэтому отклик на них в структуре сигнала предположительно может быть заметен только на высоких частотах [12]. Поэтому для более детального анализа было выполнено разложение сигнала по методу главных компонент (principal component analysis – PCA). Этот метод предполагает разложение многомерного набора данных на набор последовательных ортогональных компонентов, которые объясняют максимальную величину дисперсии (рис. 2).

Для его реализации в Matlab предусмотрена такая функция как  $imf = vmd(x)$ , которая основана на методе Гильберта-Хуана, позволяющего разложить сложный многочастотный сигнал на эмпирические моды. Функция Vmd используется для разложения и упрощения сложных сигналов на конечное число собственных модовых функций (IMF), необходимых для проведения спектрального анализа [3].

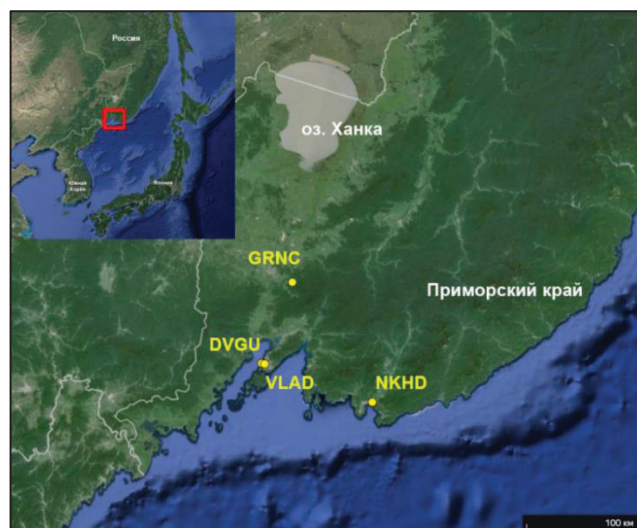


Рис. 1. Район исследования

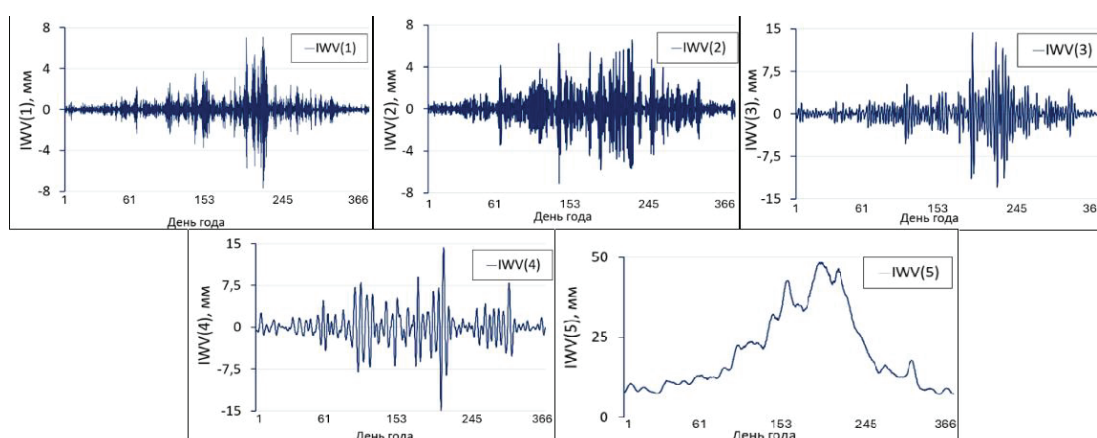


Рис. 2. Разложение IWV по методу PCA за 2020 год, Владивосток (VLAD).

**Результаты и их обсуждение.** В процессе данного исследования были рассмотрены три периода, в которые были зафиксированы пыльные или песчаные бури.

Первое такое рассматриваемое событие произошло в начале марта 2019 года. Как видно из рисунка 4, в ходе изменения концентрации пылевых частиц и интегрального влагосодержания с 1 по 7 марта между двумя графиками наблюдается временная корреляция. Сильный ливень прошел 20.03.2019, сопровождался «грязными» осадками, на представленных графиках так же хорошо различим общий тренд для рядов IWV и концентрации пыли во второй половине месяца.

Далее была рассмотрена пылевая буря, датируемая 22 и 23 января 2020 года (рис. 5). В целом ряд интегрального влагосодержания частично совпадает с ходом изменения концентрации пыли, особенно во второй половине января, когда содержание IWV за несколько дней до пылевой бури постепенно повышается, параллельно с этим увеличивается и количество частиц пыли. После 23 января происходит резкое заметное снижение обоих параметров.

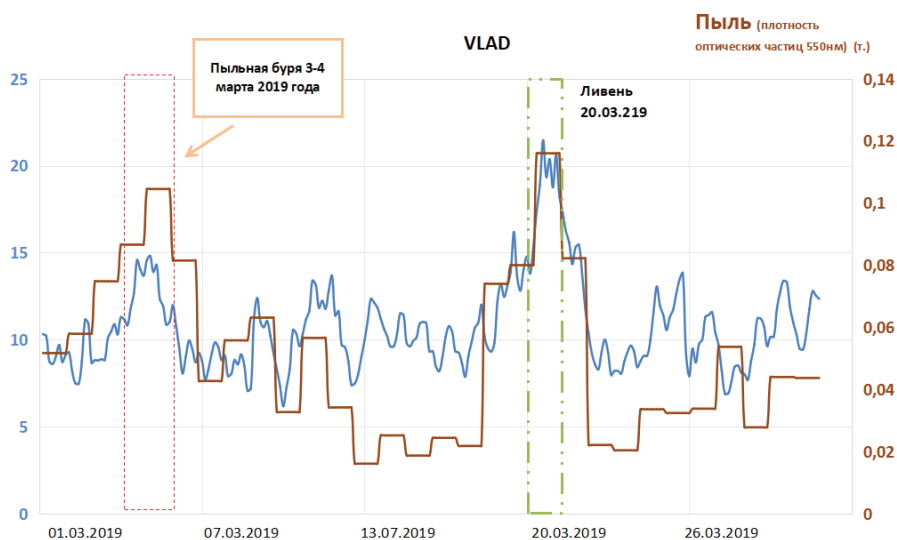


Рис. 4. Изменение концентрации интегрального влагосодержания IWV и частиц пыли во время пыльной бури 03.03.2019-04.03.2019 в г. Владивосток.

Сильная песчаная буря, принесенная из пустыни Гоби, произошла 15.03.2021 на территории Северного Китая [12], эффект от этого события достиг и территории Приморского края. По данным, полученным со станций во Владивостоке и Находке, явно зафиксировано резкое повышение концентрации интегрального влагосодержания 15 марта. По информации местных СМИ и метеоисточников 28 марта 2021 года также зарегистрирована локальная пыльная буря на юге Приморья. К сожалению, в нашем распоряжении нет данных о концентрации пыли и других загрязняющих частиц за март 2021 года, поэтому нет возможности оценить их взаимосвязь с изменением IWV, однако, судя по графикам на рисунке 6, отклик на эти явления в концентрациях водяного пара в тропосфере присутствует.

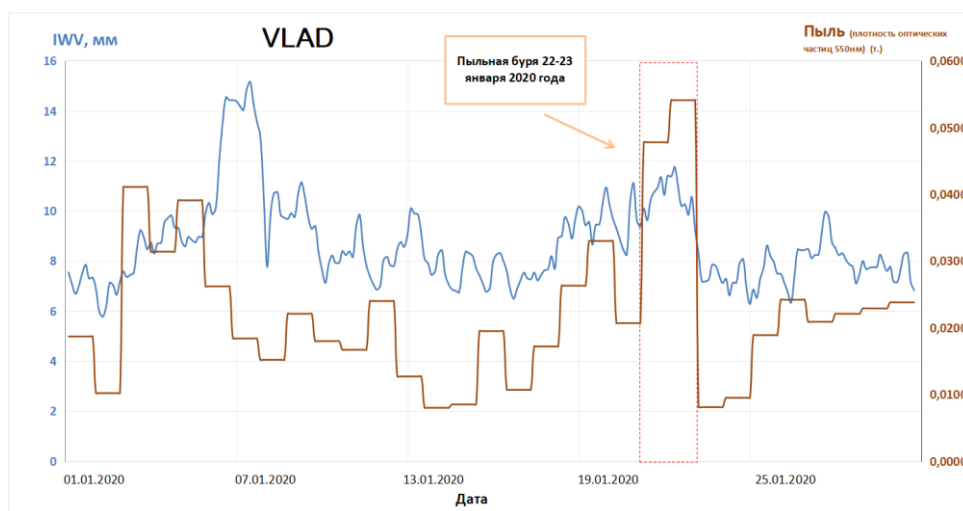


Рис. 5. Изменение концентрации интегрального влагосодержания IWV и частиц пыли во время пыльной бури 22.01.2020-23.01.2020 в г. Владивосток.

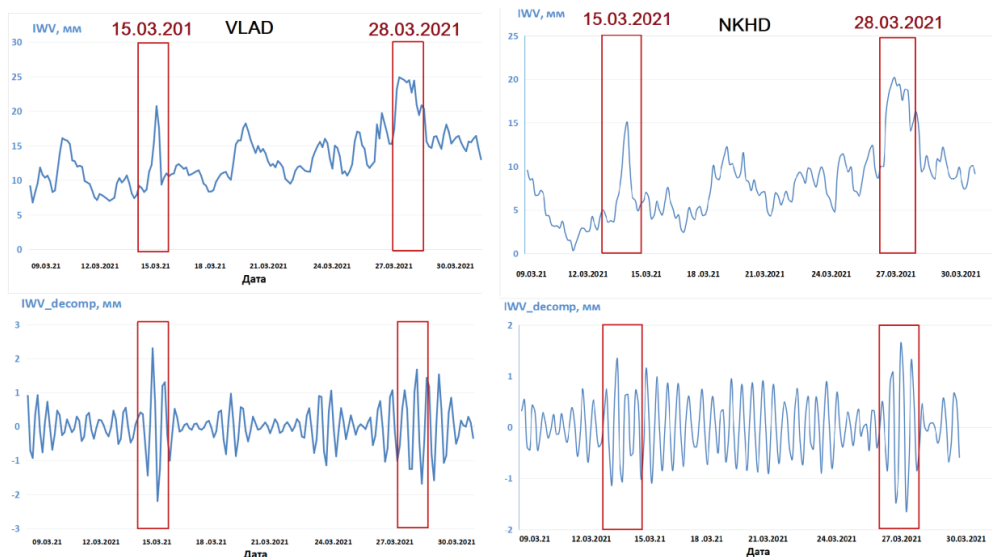


Рис. 6. Изменение концентрации интегрального влагосодержания IWV во время пыльных бурь 15.03.2021 и 28.03.2021 в г. Владивосток и Находка

### Заключение

В настоящем исследовании реализована методика определения интегрального влагосодержания в нижней тропосфере Земли по данным трех пунктов ГНСС-наблюдений на территории Приморского края. Рассмотрены три случая выхода на территорию Приморского края пыльных и песчаных бурь. Выполнено сравнение изменения интегрального влагосодержания IWV и концентрации пылевых частиц в воздухе. Показано, что максимумы концентрации опасных твердых частиц в атмосфере согласуются с данными IWV. Обсуждаются перспективы использования ГНСС-технологий в системах мониторинга качества воздуха, однако требуется более углубленное изучение этого вопроса и большее количество данных для наработки достоверной статистики.

### Литература

1. Быков В. Г., Шестаков Н. В., Герасименко М. Д., Сорокин А. А., Коновалов А. В., Прытков А. С., Василенко Н. Ф., Сафонов Д. А., Коломиец А. Г., Серов М. А., Пупатенко В. В., Королев С. П., Верхотуров А. Л., Жижерин В. С., Рябинкин К. С. Единая сеть геодинимических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения // Вестник ДВО РАН. – 2020. – № 3. – С. 5–24
2. Василевский Д. Н., Василевская Л. Н., Лисина И. А., Мушта Б. Б. Анализ загрязнения атмосферы в Приморском крае в 2019–2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 4 (382). – С. 149–162
3. Декомпозиция сигналов на компоненты (Проблема матричной факторизации) [электронный ресурс] – URL: <https://scikit-learn.ru/decomposition/> (дата обращения: 22.06.2025)
4. Кишкина А. К., Шестаков Н. В., Бугаец А. Н., Гончуков Л. В., Соколов О. В. Результаты сравнения интегрального содержания водяного пара в атмосфере по данным глобальной системы прогнозирования (GFS) и GNSS-наблюдений (Приморский край, Россия) // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 6. – С. 766–778.

5. Кишкина А.К., Шестаков Н.В., Лисина И.А., Василевский Д.Н. О некоторых аспектах применения ГНСС-технологий в метеорологии и экологии // Материалы конференции «Инетерексэкспо. ГЕО-Сибирь». – 2023. – Т. 4. – №4. – С. 89–98
6. Кондратьев И.И., Качур А.Н. Изменчивость кислотности осадков на территории Дальневосточного Федерального округа // География и природные ресурсы. – 2023. № 2. С. 115–122
7. Шестаков Н. В., Кишкина А. К., Бугаец А. Н, Гончуков Л. В., Королев С. П., Василевская Л. Н, Лялюшко Е.А. Исследование изменения интегрального влагосодержания в тропосфере по данным ГНСС-наблюдений в зоне перехода «континент – океан» (Приморский край, Дальний Восток России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – №5. – С. 266–276
8. Якименко Л. В., Гриванов И. Ю. Загрязнение атмосферы предприятиями энергетической отрасли Приморского края // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. - 2012. - С. 214-224.
9. Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R., Ware R. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System // J. Geophysical Research. – 1992. – Vol. 97. – P. 787–801
10. Guo J., Hou R., Zhou M., Jin X., Li G. Detection of Particulate Matter Changes Caused by 2020 California Wildfires Based on GNSS and Radiosonde Station // Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – Vol. 4557. – 16 p.
11. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E., GNSS — Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, GALILEO and more, Wien: Springer Science and Business Media, 2008. – 518 p.
12. Zhou M., Guo J., Liu X., Hou R., Jin X. Analysis of GNSS-Derived Tropospheric Zenith Non-Hydrostatic Delay Anomaly during Sandstorms in Northern China on 15th March 2021 // Remote Sensing. – 2022. – Т. 14. – Vol. 4678. – 14 p.