

А. К. Кишкина^{1,3}, Н. В. Шестаков^{1,2}, И. А. Лисина¹, Д. Н. Василевский⁴*

О некоторых аспектах применения ГНСС-технологий в метеорологии и экологии

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

² Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

³ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

⁴ Дальневосточный филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский

институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Владивосток,

Российская Федерация

*e-mail: kishkina.ako@dvfu.ru

Аннотация. В данном исследовании рассматривается возможность применения высокоточного спутникового геодезического оборудования для целей метеорологии и мониторинга качества воздуха. Выявлено, что в полученных в процессе постобработки результатах спутникового позиционирования зенитных тропосферных задержках (*ZTD*), заключена информация о концентрации содержащегося в тропосфере водяного пара, который является чувствительным к различным явлениям в приземном слое атмосферы параметром. Проанализированы ряды изменения концентрации интегрального влагосодержания (*IWV*) за 2019 год, полученные по данным со стационарных пунктов ГНСС-сети Приморского края, установлена высокая корреляция *IWV* с выпавшими за рассматриваемый период осадками, в частности вызванными тайфунами. Рассмотрены особенности изменения *IWV* во время ледяного дождя в ноябре 2020 года. Так же, обнаружена взаимосвязь между *IWV* и концентрацией твердых частиц PM10, которые являются одними из основных показателей загрязнения воздуха. Анализируется общая связь между метеопараметрами (температура и давление воздуха, осадки *IWV* и твердыми частицами PM10. Обсуждаются перспективы внедрения ГНСС-технологий в ныне действующие системы метеопрогнозирования и мониторинга загрязнений воздуха.

Ключевые слова: ГНСС-позиционирование, загрязнение воздуха, PM10, ZTD, водяной пар

A. K. Kishkina^{1,3}, N. V. Shestakov^{1,2}, I. A. Lisina¹, D. N. Vasilevsky⁴*

On some aspects of the application of GNSS technologies in meteorology and ecology

¹ Far Eastern Federal University, 8 Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russian Federation

² Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

³ Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690041, Russian Federation

⁴ Far Eastern Branch of FSBI Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Vladivostok, Russia

*e-mail: kishkina.ako@dvfu.ru

Abstract. This study considers the possibility of using high-precision satellite geodetic equipment for the purposes of hydrometeorology and air quality monitoring. It was revealed that the results of satellite positioning of zenith tropospheric delays (*ZTD*) obtained during post-processing contain information on the concentration of water vapor contained in the troposphere, which is a parameter that is sensitive to various phenomena in the surface layer of the atmosphere. The data of integrated water vapor (*IWV*) concentration changes for 2019, obtained by stationary points of the GNSS network of

Primorsky Krai, is analyzed. A high correlation of *IWV* with precipitation during the period under consideration, in particular, caused by typhoons, is established. The features of the change in *IWV* during freezing rain in November 2020 are considered. There was found a relationship between *IWV* content and the concentration of particulate matter PM10, which are one of the main indicators of air pollution. The general relationship between meteorological parameters (temperature and air pressure, precipitation), *IWV* content and solid particles PM10 is analyzed. The prospects for the introduction of GNSS technologies into the currently operating systems for meteorological forecasting and monitoring of air pollution are discussed.

Keywords: GNSS, air pollution, PM10, ZTD, water vapor

Введение

За последние два десятилетия многие исследования в области ГНСС-технологий продемонстрировали обширные возможности применения результатов спутникового позиционирования во многих областях прикладной и фундаментальной науки. Данные глобальных спутниковых систем активно применяются не только по прямому их назначению – высокоточное определение координат объектов на поверхности Земли, но и в ряде других направлений. К примеру, в области геодинамики для определения закономерностей и параметров движения литосферных плит [1], в сейсмологии для регистрации косейсмических (мгновенных) и постсейсмических смещений земной поверхности, вызванных землетрясениями [2], в целях мониторинга цунами, которые также происходят в результате сейсмической активности [3]. Кроме того, с помощью специализированного ГНСС-оборудования регистрируются отклики в ионосфере, вызванные такими явлениями, как извержения вулканов [4]. В гидрометеорологии применяются данные об интегральном влагосодержании, определенном по полученным в процессе постобработки результатов ГНСС-наблюдений зенитным тропосферным задержкам [5]. Подобные исследования уже проводились на юге Дальнего Востока Российской Федерации [6, 7].

Самые последние исследования демонстрируют перспективы создания системы мониторинга песчаных бурь, основой которого является уже известный нам метод извлечения из тропосферных задержек информации об интегральном влагосодержании атмосферы. Во время песчаных и пыльных бурь значительно повышается концентрация твердых частиц PM2.5 (твердые частицы размером 2,5 микрона или менее) и PM10 (твердые частицы размером от 2,5 до 10 микрон), которые состоят из множества токсичных и опасных веществ, попадающих при вдыхании непосредственно в легкие и вызывающих респираторные и сердечно-сосудистые заболевания [8]. Соответственно, такие явления негативно сказываются на качестве жизни людей и экономике как отдельных регионов, так и государства в целом. Однако причиной увеличения концентрации опасных твердых частиц далеко не всегда служат песчаные и пыльные бури, которые отличаются внезапным возникновением и имеют короткую продолжительность. На качество воздуха влияют выхлопные газы, выбросы токсичных отходов, работа тепловых электростанций, заводов и фабрик, и т.д., чей вклад в экологическую обстановку носит уже привычный рутинный характер для крупных населенных пунктов.

На сегодняшний день проблемы, связанные с экологической обстановкой, особо актуальны, в этой связи интерес вызывает возможность мониторинга загрязнения воздуха с высокой частотой дискретизации в приближенном к реальному времени режиме, что вполне может быть обеспечено сетью непрерывно действующих ГНСС-станций. Чрезвычайно удобно и выгодно то, что абсолютно те же данные можно применять для решения метеорологических задач, а именно для прогноза сильных ливневых осадков. Такие подходы могут стать качественными дополнениями к уже существующим методам оперативного прогнозирования погоды и наблюдения за загрязнением воздуха, которые не требуют разветвления новой инфраструктуры – сеть ГНСС-станций уже на протяжении многих лет бесперебойно работает в Приморском крае, предоставляя сведения не только для высокоточного определения координат, но и для ряда направлений научно-исследовательских изысканий.

Методы и материалы

Для моделирования и оценки задержки спутникового сигнала в тропосфере, ее условно подразделяют на два слоя: верхний (сухой, гидростатический) и нижний (влажный) слои. Гидростатическая компонента тропосферной задержки составляет около 90% от величины ZTD и достаточно просто определяется, поскольку сравнительно медленно варьирует в пространстве с течением времени, и зависит, главным образом, от приземного давления воздуха и высоты пункта над уровнем моря. Моделирование приземной (влажной) части тропосферы значительно сложнее, поскольку задержка определяется распределением и концентрацией водяного пара в воздухе, которые подвержены значительным флуктуациям. В данном случае используется кусочно-непрерывный подход, когда влажная тропосферная задержка, принимается равной константе и оценивается на некотором небольшом временном интервале, который практически может быть доведен до уровня дискретности ГНСС-измерений [9]. Методика реализации расчетного алгоритма подробно описана в работах [6, 7].

В качестве объектов исследований выбраны крупные портовые города Приморского края Владивосток и Находка, находящиеся на побережье региона, а также расположенный в континентальной части Приморья Дальнереченск (рис.1 карта). В черте города Владивосток установлены несколько ГНСС-станций (в работе использованы данные пунктов DVGU, VLAD) и пункт международной метеорологической сети аэрологического зондирования № 31977 «Сад-Город». По одному пункту ГНСС-наблюдений расположено в городах Находка (NKHD) и Дальнереченск (IMAN), в последнем находится еще один пункт аэрологического зондирования № 31873 «Дальнереченск» (рис. 1).

Вследствие особого расположения Приморского края в зоне перехода «континент-океан», исследуемый регион отличается крайне неустойчивыми погодными условиями, по этой причине оперативный прогноз погоды на регион требует уточнения современными методами наукастинга. Кроме того, на погоду Приморского края каждый год (особенно с июля по сентябрь) оказывают влияние от 1 до 4 тропических циклонов (тайфунов). Ураганные ветры и сильные до-

жди приводят к наводнениям, которые зачастую носят опасный разрушительный характер. В целях исследования возможности прогноза сильных ливневых осадков были взяты данные, полученные в пунктах VLAD и IMAN, которые соответственно расположены в прибрежной и континентальной зонах региона и находятся вблизи действующих метеостанций.



Рис. 1. Район исследования

Для рассмотрения взаимосвязи между частицами PM10 и изменением концентрации I_{VV} были выбраны ГНСС-пункты DVGU и NKHD. Владивосток является столицей Дальнего Востока с населением около шестисот тысяч человек. В черте города расположен крупный порт, различные промышленные объекты, а также плотная транспортная сеть. В портовых городах морские суда являются одним из источников выбросов загрязняющих веществ, вносящих весомый вклад в общую массовую концентрацию РМ в атмосфере. Кроме того, город признан самым автомобилизированным в России, а автотранспорт является основным источником выхлопных газов, в которых содержатся опасные частицы. В Находке расположены пять морских терминалов, занимающихся отгрузкой угля различных марок открытым способом. Угольная пыль, образующаяся при добыче, перевалке и переработке угольного сырья, является сильнейшим загрязнителем воздуха, провоцирующим целый спектр респираторных заболеваний [10].

Результаты и их обсуждение

В соответствии с методикой на ГНСС-пунктах в городах Владивосток, Дальнереченск, Находка с трёхчасовым интервалом были получены ряды изменений I_{VV} за 2019 год. Верификация данных об интегральном влагосодержании выполнена в работах [6, 7] с применением аналогичных параметров из каталогов результатов аэрологического зондирования (<https://weather.uwyo.edu/upperair/>

sounding.html) и на основе глобальной климатической модели Reanalysis ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>).

За период с середины июля по начало сентября 2019 года Приморский край подвергся воздействию пяти сильных тайфунов и тропического ливня, который принес в регион осадки до 80 мм (рис. 2). Из графиков изменения концентрации *IWV* и выпавших за исследуемый период осадков хорошо заметно, что максимум *IWV* не всегда совпадает с пиком выпадения осадков, а опережает его на 3–9 ч, т. е. сильные осадки, как правило, выпадают на спаде *IWV*. Также необходимо отметить, что одним из признаков сильных осадков является увеличение скорости изменения *IWV* во времени. Проанализировав изменение *IWV*, полученное по данным всех доступных ГНСС-пунктов, и выпавшие осадки за 5 ежегодных периодов тайфунной активности (с 2015 по 2019 годы), мы выявили следующую закономерность: если за час концентрация интегрального влагосодержания увеличивается более, чем на 2 мм, с вероятностью 70-75% вблизи исследуемой области пройдут сильные (>10 мм) осадки. Обозначенные признаки вполне могут быть использованы в целях оперативного прогнозирования в режиме, приближенном к реальному времени.

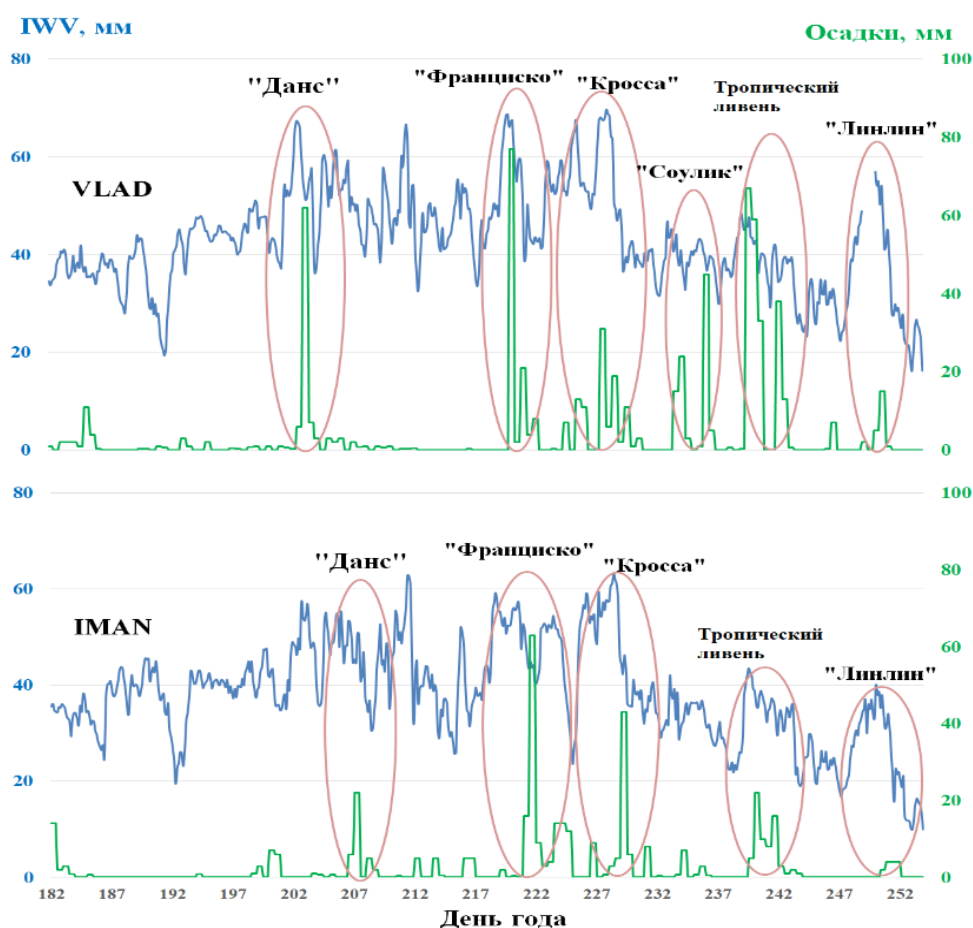


Рис. 2. Графики согласования изменения концентрации интегрального влагосодержания и выпавших осадков за июль-сентябрь 2019 года во Владивостоке и Дальнереченске. Красными овалами отмечены моменты прохождения тайфунов

В ноябре 2020 года Приморье, в частности город Владивосток, находилось под влиянием такого редкого явления, как ледяной дождь. Ледяной дождь — смешанные атмосферные осадки, выпадающие из облаков при отрицательной температуре воздуха. Ледяной дождь наблюдается при наличии температурной инверсии, когда у поверхности земли находится холодный воздух, а над ним располагается слой более тёплого воздуха с положительной температурой. Обычно, судя по полученным нами результатам, перед выпадением осадков концентрация водяного пара в тропосфере возрастает. В случае ледяного дождя в Приморском крае на фоне резко понизившегося атмосферного давления выпадение осадков началось раньше увеличения концентрации водяного пара. Разница температур — отрицательная в приземном слое и положительная в слое выше — хорошо заметна в данных аэрологического зондирования (рис. 3), глубина инверсии составила 8,9°С.

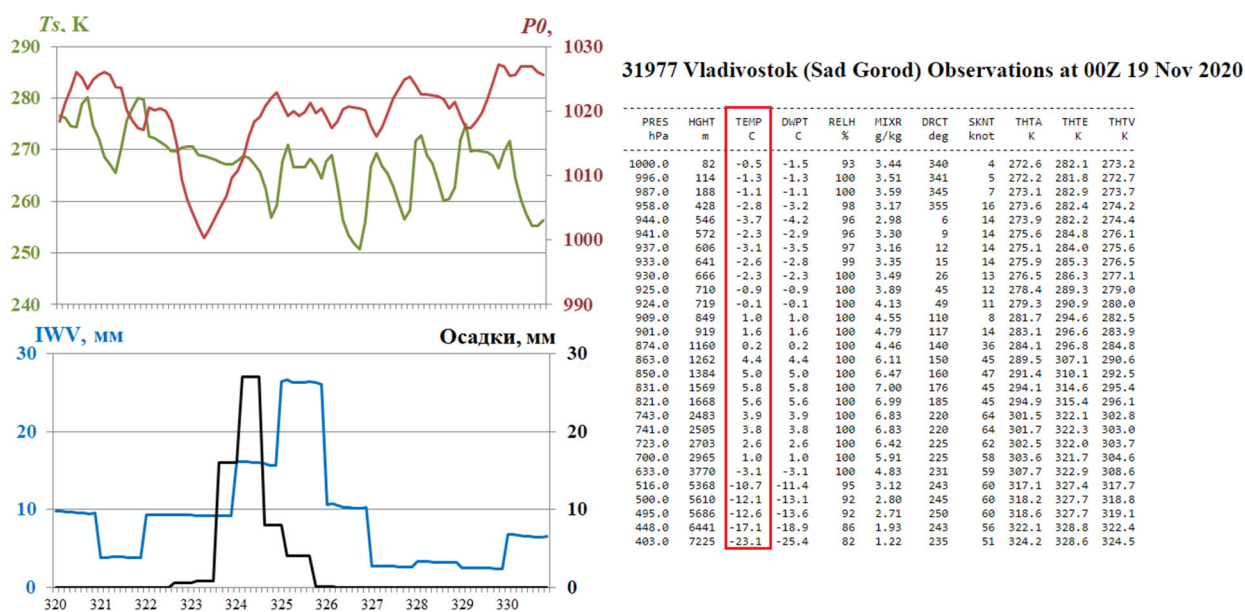


Рис. 3. Изменение интегрального влагосодержания, температуры и давления воздуха, интегрального влагосодержания, выпавших осадков в период ледяного дождя, пункт VLAD (слева). Файл результатов аэрологического зондирования (справа)

Однако, не всегда резкое повышение содержания интегрированного водяного пара в атмосфере связано с выпадением осадков, отмечено, что в ряде случаев увеличение влагосодержания невозможно объяснить через изменение метеопараметров. Ознакомившись с работой [8], мы проанализировали изменение уровня загрязнения воздуха в городах Владивосток и Находка и рядом колебания *IWV* за периоды с января по апрель и с октября по декабрь 2019 года. Теплый период года с мая по октябрь был исключен из рассмотрения из-за высокого уровня влажности, вследствие чего уровень пыли и твердых частиц в воздухе значительно сокращается. С помощью функции Sum of Sine третьей степени в

программном пакете Matlab из ряда изменения IWV был убран сезонный тренд. На графиках рис. 4 в некоторых случаях можно увидеть, что резкий всплеск IWV , возрастающего на 1-2 мм в течение часа, что обычно является предвестником осадков, неплохо согласуется с повышением концентрации опасных твердых частиц PM_{10} в воздухе. Особенно хорошо заметна эта тенденция в сухой холодный период года, с ноября по март. Изменение насыщенности воздуха частицами PM_{10} имеет определенные закономерности, например, концентрация вредных частиц заметно снижается после выпадения осадков, т.е. воздух очищается. Из графиков видно, что значительные по амплитуде (>10 мм) колебания IWV могут происходить несколько дней подряд, в течение которых осадки либо не фиксируются, либо не превышают 3 мм, но в течение этого времени сохраняется высокий уровень концентрации частиц PM_{10} .



Рис. 4. Графики изменения IWV , полученных по данным пунктов DVGU и NKHD, концентрации частиц PM_{10} и выпавших за наблюдаемый период осадков.

Заключение

В настоящем исследовании реализована методика определения интегрального влагосодержания в нижней тропосфере Земли по данным пунктов ГНСС-наблюдений на территории Приморского края. Анализ изменения содержания водяного пара во время движения тайфунов через пункты наблюдения показал, что более 60% сильных осадков (>20 мм) выпадают в течение 3–9 ч на фоне снижения концентрации IWV после резкого возрастания, регистрируемого ГНСС-методами, интегрального влагосодержания. Так же признаком, который

предвещает выпадение сильных ливневых осадков, служит изменению скорости увеличения содержания IWV – если интегральное содержание атмосферного водяного пара в течение часа повышается более, чем на 2 мм, с вероятностью 70-75% в исследуемой области пройдут осадки >10 мм. Описанные результаты в совокупности с метеопараметрами (температура и давление воздуха) открывают большие перспективы улучшения методов оперативного прогнозирования сильных осадков. Однако в случае ледяного дождя такая методика не показала эффективности, но само это событие является аномальным для региона, поэтому достаточно сложно его спрогнозировать и выявить определённые закономерности за единственный инструментально зафиксированный такой случай.

В холодный сухой сезон года (ноябрь-март) резкие значительные по амплитуде флуктуации IWV , за которыми не следует выпадение осадков, в ряде случаев хорошо согласуются с повышенным содержанием твердых частиц PM_{10} в воздухе. Однако для организации мониторинга опасных твердых частиц с применением ГНСС-технологий требуется более углубленное изучение этого вопроса и большее количество данных для наработки достоверной статистики.

Тем не менее, описанные в настоящей работе результаты в очередной раз подтверждают многофункциональность и многопрофильность спутникового геодезического оборудования и широкий спектр применения получаемых в процессе наблюдений и обработки данных в различных отраслях прикладной и фундаментальной науки.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта научного фонда Дальневосточного Федерального университета № 22-07-01-007.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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 геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения // Вестник ДВО РАН. – 2020. – № 3. – С. 5–24.

2. Shestakov N. V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A. S., Bykov V. G., Gerasimenko M. D., Luneva M. N., Gerasimov G. N., Kolomiets A. G., Bormotov V. A., Vasilenko N. F., Baek J., Park P., Serov M. A. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 524-525. – P. 76–86.

3. Pupatenko V. V., Shestakov N. V. Using Global Navigation Systems for Early Tsunami Warning about Tsunamis Excited by Magnitude 7–8 Earthquakes // Journal of Volcanology and Seismology. – 2021. – Vol. 15. – №1, – P. 26–34.

4. Shestakov N. V., Orlyakovskiy A. V., Perevalova N.P., Titkov N.N., Chebrov D.V., Ohzono M., Takahashi H. Investigation of Ionospheric Response to June 2009 Sarychev Peak Volcano Eruption // Remote Sens. – 2021. – Т. 13. – Vol. 638. – 18 p.

5. 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.

6. 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.

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. 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.

9. 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.

10. 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

© А. К. Кишкина, Н. В. Шестаков, И. А. Лисина, Д. Н. Василевский, 2023