



Научная статья

УДК 551.506.2 (571.54)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.49.29>

Показатель пожарной опасности для лесной среды с использованием метеорологических и GPS-данных на территории Забайкальского национального парка

М. Г. Дембелов*

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

М. Е. Овдин

Объединенная дирекция Баргузинского государственного природного биосферного заповедника и Забайкальского национального парка, п. Усть-Баргузин, Россия

Аннотация. Отмечено, что оперативное обнаружение пожарной опасности должно являться обязательной частью системы охраны лесной среды, для чего рекомендуется использование автоматических инструментов на основе комплексных метеорологических наблюдений. Постоянные GPS-измерения, помимо высокоточной геодезии, позволяют регулярно получать данные о тропосферной задержке сигналов, которые в свою очередь дают информацию о суммарном влагосодержании в условном вертикальном столбе (IWV). Показана возможность использовать полученные значения IWV для оценки пожарной опасности лесных угодий с учетом данных метеостанции Усть-Баргузин, расположенной на территории Забайкальского национального парка. Предложено создание интернет-ресурса о комплексном показателе Нестерова по GPS-измерениям и метеорологическим данным, который позволит выполнять мониторинг пожарной опасности в лесу в режиме реального времени.

Ключевые слова: метеонаблюдения, GPS-измерения, влагосодержание тропосферы, показатель Нестерова, пожароопасность.

Для цитирования: Дембелов М. Г., Овдин М. Е. Показатель пожарной опасности для лесной среды с использованием метеорологических и GPS-данных на территории Забайкальского национального парка // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 49. С. 29–39. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.49.29>

Original article

Fire Danger Indicator for the Forest Environment Using Meteorological and GPS data on the Territory of the Transbaikalian National Park

M. G. Dembelov*

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

M. E. Ovdin

Joint Directorate of Barguzin State Natural Biosphere Reserve and Transbaikalian National Park, Ust-Barguzin, Russian Federation

© Дембелов М. Г., Овдин М. Е., 2024

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. The main indicators of potential fire hazards are temperature, relative humidity, precipitation, and wind speed readings. Prompt detection of fire risk should be an integral part of forest protection systems. For this purpose, it is essential to use automatic instruments based on comprehensive meteorological observations. In recent years, most forest fires in the Republic of Buryatia have started due to natural rather than anthropogenic causes. To assess the risk of forest fire based on current weather conditions, the Nesterov index is used. Continuous GPS measurements, combined with high-precision geodetic techniques, allow us to regularly obtain data on tropospheric signal delays, which provide information about the total water vapor content in the atmosphere (IWV). The possibility of using the IWV values obtained to assess the fire risk of forest areas is demonstrated, taking into account data from the Ust-Barguzin weather station located on the territory of the Trans-Baikal National Park. Creating an online resource based on Nesterov's complex indicator using GPS measurements and meteorological data would allow for real-time monitoring of fire risk in forests.

Keywords: weather observations, GPS measurements, moisture content of the troposphere, Nesterov index, fire hazard.

For citation: Dembelov M.G., Ovdin M.E. Fire Danger Indicator for the Forest Environment Using Meteorological and GPS data on the Territory of the Transbaikalian National Park. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 49, pp. 29-39. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.49.29> (in Russian)

Введение

В настоящее время регулярные GPS-измерения находят свое применение в различных научных и практических приложениях. Помимо точного позиционирования они используются для исследования верхней (ионосфера) [Афраймович, Перевалова, 2006; Детектирование перемещающихся ионосферных ... , 2004] и нижней (тропосфера) [Bevis, Businger, Chriswell, 1994; Accuracy and variability ... , 2003] частей атмосферы Земли. Суммарное влагосодержание тропосферы определяется из данных о полной зенитной задержке GPS-сигналов. Использование GPS-данных дает возможность определения точки росы для последующего нахождения показателя пожароопасности лесной среды [Болданова, 2024].

Лесные пожары ежегодно наносят существенный экологический и экономический ущерб Республике Бурятия, большая часть территории которой, в том числе Забайкальского национального парка, характеризуется малоснежными зимами, имеет место постоянная подверженность блокирующим областям антициклонов, которые препятствуют проникновению влажных циклонов, как правило, в мае и июне. Это определяет наличие длительных периодов сухих воздушных масс с малым количеством атмосферных осадков и, как следствие, возникновение лесных пожаров. Высокий уровень горимости связан с преобладанием в составе лесов светлохвойных древесных пород [Иметхенов, 2015]. Начиная с 2015 г. в Республике Бурятия с целью предотвращения лесных пожаров в период с конца апреля по конец октября законодательно запрещен доступ в лесную зону для всех граждан. В связи с этим большинство лесных пожаров стало возникать по естественным причинам. Пик грозовой активности приходится на июль, в этот же месяц отмечается максимальное количество выпавших атмосферных осадков, которых зачастую оказывается недостаточным для полной гарантии отсутствия пожаров.

В 2015 г. из-за сильной засухи произошли обширные лесные пожары, которые привели к большим площадям выгоревшей территории. На рис. 1 представлены сравнительные карты п-ова Святой Нос до (2014 г.) и после пожаров (2015 г.). Для эффективного контроля за лесными пожарами необходимо оперативно обнаруживать и предупреждать их возникновение. Важнейшим инструментом является использование метеорологических наблюдений. Пожары распространяются быстрее при низкой влажности воздуха и сильном ветре.

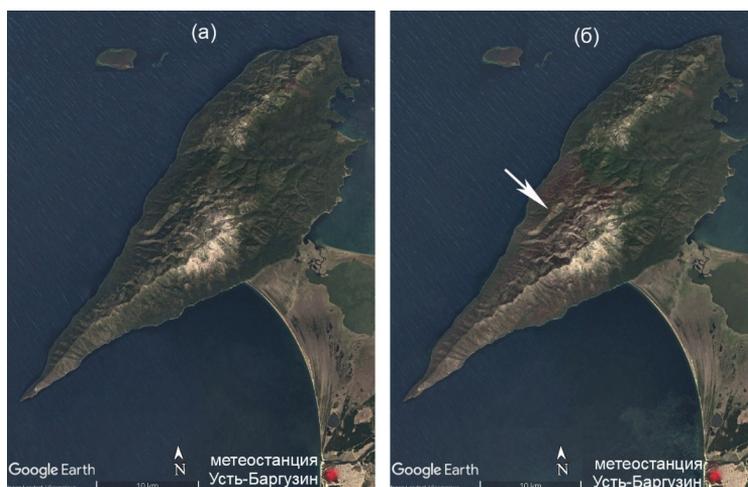


Рис. 1. Фрагмент территории Забайкальского национального парка (п-ов Святой Нос) до (лето 2014 г.) (а) и после сильных пожаров (лето 2015 г.) (б), стрелкой указан выгоревший участок лесного массива

Методы исследования

Метеорологические данные (без учета ветра) используются для определения показателя пожароопасности Г. В. Нестерова G для лесной зоны¹:

$$G = \sum_{i=1}^n t_i d_i, \quad (1)$$

$$d_i = t_i - r_i. \quad (2)$$

Здесь t – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на 12 ч дня по местному времени; r – точка росы ($^{\circ}\text{C}$) на 12 ч дня по местному времени; d – дефицит точки росы; n – число дней после последнего выпадения жидких осадков. Степень опасности возникновения лесных пожаров по метеоусловиям определяется согласно общероссийской шкале (табл.).

¹ ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. М. : Изд-во стандартов, 1999.

Таблица

Шкала пожарной опасности в лесу по метеоусловиям²

Класс пожарной опасности	Диапазон значений показателя горимости G	Уровень пожарной опасности
1	0–300	Отсутствует
2	301–1000	Малый
3	1001–4000	Средний
4	4001–10 000	Высокий
5	> 10 000	Чрезвычайный

Для расчета показателя пожароопасности по формулам (1) и (2) точку росы можно определять, используя постоянные GPS-измерения. Для этого прибегают к данным по тропосферной задержке, которые получаются в результате обработки первичных GPS-данных [Accuracy and variability ... , 2003; A near real time ... , 2000]. GPS-измерения позволяют зондировать нижнюю атмосферу для определения суммарного влагосодержания с высоким разрешением независимо от метеорологических условий. Первичные данные в формате RINEX 2.11 обрабатываются либо программным пакетом GAMIT [King, Bock, 2000], либо посредством специального приложения ТтороGNSS [Калинников, Хуторова, 2014].

Полная зенитная тропосферная задержка (ZTD) является суммой «сухой» (ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих: $ZTD = ZHD + ZWD$. Для моделирования ZHD и ZWD по приземным метеорологическим данным можно использовать формулы [Hopfield, 1969]:

$$ZHD = 0,0023 p - 0,00497 \frac{p}{T}, \quad (3)$$

$$ZWD = 821,16 \frac{e}{T^2}. \quad (4)$$

Здесь ZHD и ZWD – «сухая» и «влажная» компоненты полной тропосферной задержки; p – атмосферное давление, мбар; T – температура, К; e – парциальное давление водяного пара, гПа.

Согласно формуле (4) парциальное давление водяного пара можно выразить по данным ZWD и приземной температуры $T = t + 273,16$. Точка росы рассчитывается по известной приближенной формуле:

$$r = \frac{240 \cdot [\psi_t + \ln(Rh/100)]}{17,5 - [\psi_t + \ln(Rh/100)]}, \quad (5)$$

здесь $\psi_t = \frac{17,5 \cdot t}{t + 241}$; с учетом соотношения (4) $\frac{Rh}{100} = \frac{e}{6,112 \cdot \exp(\psi_t)}$, Rh – относительная влажность воздуха, %.

Водяной пар в атмосфере играет ключевую роль в тепловом балансе нашей планеты. Солнечная радиация частично отражается от земной по-

² Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. М. : Гидрометеиздат, 1975.

верхности, образуя собственное излучение, главным поглотителем которого является водяной пар [Wang, Zhang, Dai, 2005; Bengtsson, Hagemann, Hodges, 2004]. Вторичное переизлучение от водяного пара в нижнем направлении создает основу парникового эффекта [Zhang, Jean-Pierre Barriot, Noruare, 2020]. «Влажная» компонента тропосферной задержки всегда пропорциональна суммарному влагосодержанию тропосферы, поэтому для ее определения достаточно вычесть из полной задержки ZTD «сухую» составляющую, рассчитанную по формуле (3).

Суммарное влагосодержание тропосферы IWV определяется над пунктом наблюдения по данным «влажной» составляющей тропосферной задержки ZWD по формуле [Lukhneva, Dembelov, Lukhnev, 2016]:

$$IWV = 10^6 \frac{T_m}{k_2 R_W} ZWD, \quad (6)$$

где k_2 – вторая постоянная индекса рефракции, $K^2/\text{мбар}$ [Geodesy by radio ... , 1985]; R_W – газовая постоянная для водяного пара, $\text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$; T_m – средне-взвешенная температура по парциальному давлению водяного пара в вертикальном столбе над точкой приема. Параметр T_m определяется отношением интегралов [Bevis, Businger, Chriswell, 1994]:

$$T_m = \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T} dh \bigg/ \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh, \quad (7)$$

здесь h_s – высота расположения приемной антенны над уровнем моря; dh – дифференциальное приращение высоты.

Сравнение результатов по GPS-наблюдениям и метеорологии

На метеостанции Усть-Баргузин помимо приземных метеорологических наблюдений два раза в сутки (в 00:00 и 12:00 по Гринвичу) выполняются запуски радиозондов, что позволяет определять на разных барометрических уровнях температуру, относительную влажность воздуха и параметры ветра. Зондирования атмосферы выполняются от уровня земли до высот порядка 35–40 км в теплое время года. Благодаря радиозондированиям определяются значения суммарного влагосодержания нижней части атмосферы. Ближайшим к пункту Усть-Баргузин находится пункт аэрологии Ангарск, расположенный в 357 км в юго-западном направлении. В 42 км от пункта Ангарск размещен пункт постоянных GPS-наблюдений IRKM (Иркутск). Постоянный GPS-пункт ULAZ (Улан-Удэ) функционирует с 1999 г. Новый GPS-пункт MKSM (Максимиха) запущен в режим постоянных измерений в 2023 г. В качестве примера сравнения выявленных тропосферных данных по GPS-измерениям на рис. 2, а представлены графики изменения значений ZTD в течение июля 2023 г. в пунктах MKSM и ULAZ. Среднее отклонение разницы рассматриваемых данных составило 0,027 м, а коэффициент взаимной корреляции между данными – 0,57. Это довольно слабая корреляция и заметное среднее отклонение особенно с 24 по 29 июля. На рис. 2, б приведены сравнительные графики изменения уровня суммарного влагосодержания тропосферы в виде осаждаемой воды PW [Lukhneva, Dembelov, Lukhnev,

2016] в течение июля 2023 г. по GPS-измерениям в пункте МКSM и по радиозондированиям и приземным метеоданным с использованием формул (3), (4), (6) и (7) в пункте Усть-Баргузин. Расстояние между пунктами в Максимихе и Усть-Баргузине составляет примерно 24 км. Среднее отклонение и коэффициент взаимной корреляции между графиками по GPS-измерениям и радиозондированиям составили соответственно 4,6 мм и 0,83, тогда как между графиками по GPS-измерениям и приземным метеоданным они составили соответственно 4,8 мм и 0,74. Таким образом, результаты определения влагосодержания тропосферы по GPS-измерениям в пункте МКSM оказались по точности не хуже данных приземных метеонаблюдений даже на удалении 24 км.

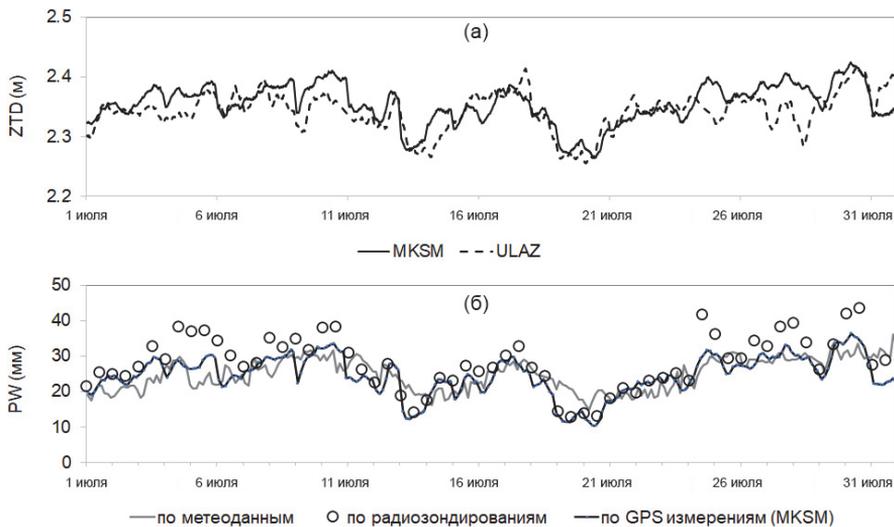


Рис. 2. Графики изменения полной тропосферной задержки в пунктах МКSM и ULAZ (а). Сравнение суммарного влагосодержания тропосферы по данным GPS-измерений в пункте МКSM (Максимиха), по радиозондированиям (Усть-Баргузин) и по приземным метеонаблюдениям (Усть-Баргузин) (б)

Для упрощения определения «влажной» компоненты тропосферной задержки ZWD из значений ZTD вычиталась константа $0,002277 \cdot p_s$ [Lukhneva, Dembelov, Lukhnev, 2016], значение $p_s = 967,3$ гПа принято равным среднему годовому значению атмосферного давления в пункте наблюдения Усть-Баргузин. Сравнение изменений значений точки росы по метеорологическим данным (<https://rp5.ru>) и рассчитанных по формуле (5) с учетом данных GPS-наблюдений за период апрель – октябрь 2015 г. представлено на рис. 3. Все метеоданные выбраны по пункту Усть-Баргузин, GPS-данные – по пункту IRKM (Иркутск). Среднее отклонение разницы рассматриваемых значений составило $4,5$ °С, коэффициент взаимной корреляции между графиками составил $0,76$. Заметные отклонения наблюдаются в апреле, начале мая и в октябре. Причем в указанные периоды пожарная опасность практически отсутствовала.

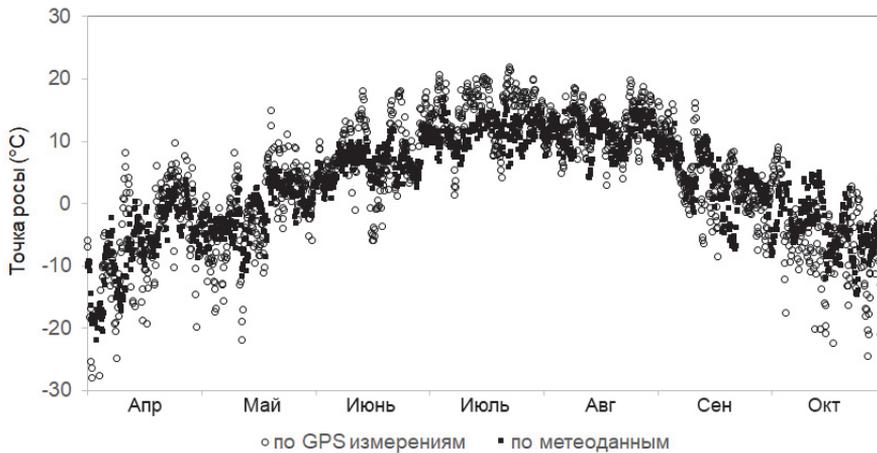


Рис. 3. Сравнение значений точки росы по метеорологическим данным в пункте Усть-Баргузин и GPS-наблюдениям в пункте IRKM (апрель – октябрь 2015 г.)

Показатель пожарной опасности леса

По полученным данным температуры воздуха и точки росы, а также количества выпавших осадков рассчитан комплексный показатель G пожарной опасности для леса по условиям погоды по формулам (1) и (2). На рис. 4 представлены графики рассчитанных значений показателя (индекса) Нестерова G в пункте Усть-Баргузин по GPS-наблюдениям и метеорологическим данным в маловодный и пожароопасный 2015 г. (апрель – октябрь). Рассчитано количество дней с уровнем пожарной опасности 5-го класса (чрезвычайный) соответственно 63 и 64; с уровнем 4-го класса (высокий) – 16 и 17; с уровнем 3-го класса (средний) – 31 и 44 согласно таблице. Расчеты показали хорошую согласованность для наиболее значимых 5-го и 4-го выявленных уровней, это подтверждает возможность использования данных GPS для определения комплексного показателя пожарной опасности для лесной зоны.

Графики изменения количества дней уровней лесной пожарной опасности (3–5-го класса) по годам (2013–2023 гг.) с апреля по октябрь для п. Усть-Баргузин представлены на рис. 5, а. Очевидно, что самым значимым является показатель 5-го класса. Сумма выпавших атмосферных осадков в те же годы в пожароопасный период показана на рис. 5, б. Ежегодные площади пожаров на территории Забайкальского национального парка представлены на рис. 5, в. Очевидно, что максимальное значение показателя Нестерова 5-го класса в 2015 г. соответствует минимальному суммарному значению выпавших осадков, а также максимальной площади выгоревших лесных угодий (17 864 га). Коэффициент взаимной корреляции между графиками для показателя Нестерова 5-го класса и площади пройденных лесных пожаров составил 0,67, это довольно высокий уровень корреляции. При сравнении двух графиков (рис. 5, а, в) из общей закономерности выпадает лишь 2020 г., когда наблюдался пик пожарной активности.

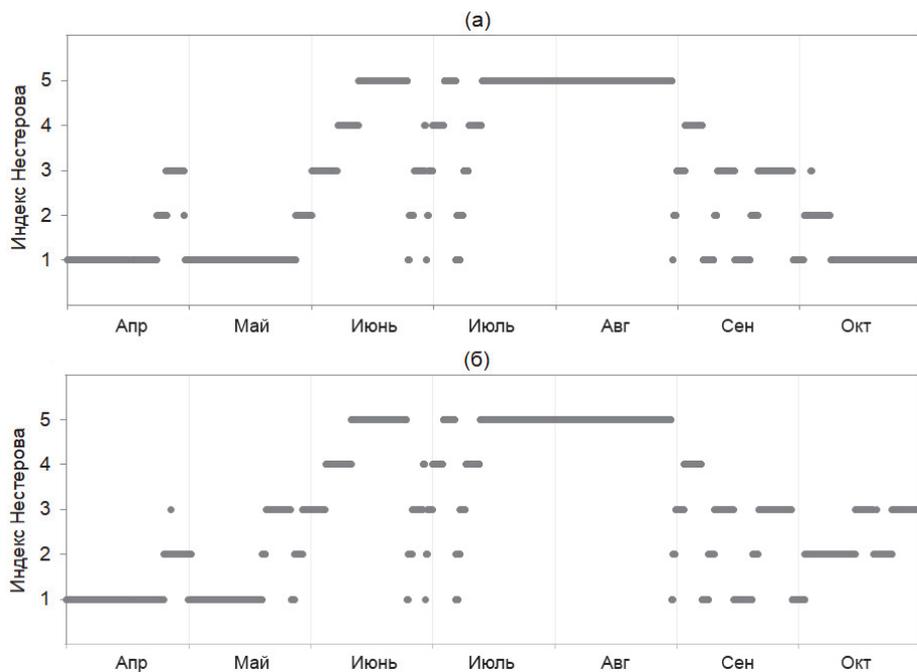


Рис. 4. Сравнение изменений показателя пожароопасности Нестерова по GPS-измерениям (IRKM) (а) и по метеорологическим данным (Усть-Баргузин) (б) за апрель – октябрь 2015 г.

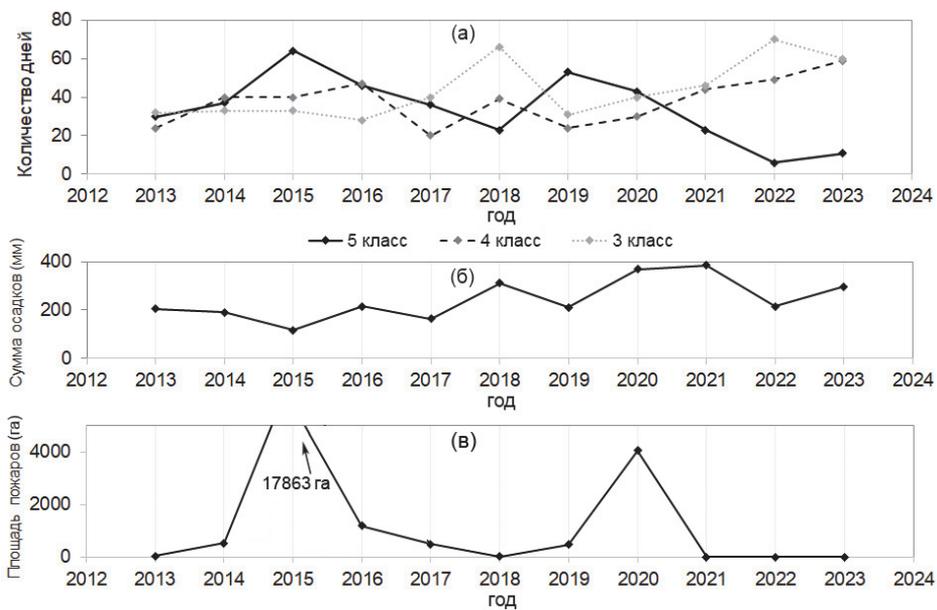


Рис. 5. Графики изменения количества дней с показателем Нестерова 5-го, 4-го и 3-го класса опасности (а), суммы осадков в пожароопасный период (б) и площади выгоревших участков леса (в) за 2013–2023 гг.

Отметим, что для всех зафиксированных пожаров подавляющей причиной возгорания после 2015 г. являлись грозы. Нарушение гражданами правил пожарной безопасности, согласно данным Министерства природных ресурсов Республики Бурятия, оказывалось незначительным, не более 0,5 % от всех случаев.

Заключение

Территория Забайкальского национального парка регулярно подвергается воздействиям лесных пожаров, вследствие чего наносится значительный ущерб всей экологической системе. В подавляющем большинстве случаев возгорания происходят в сосновых лесах с высушенной хвойной подстилкой, степень сухости которой главным образом зависит от выпадения атмосферных осадков. Непрерывные GPS-наблюдения, помимо точного позиционирования, позволяют получать регулярные данные о суммарном влагосодержании тропосферы. Обработка первичных GPS-данных выдает результаты по суммарному влагосодержанию тропосферы с временной отсечкой 30 с, а радиозондирования выполняются лишь два раза в сутки. При этом в отличие, например, от измерений радиометром водяного пара на GPS-наблюдения никак не влияют атмосферные осадки, туманы и наличие облаков. Учитывая лишь приземные данные температуры воздуха, GPS-измерения позволяют с достаточной точностью постоянно определять значения точки росы. Сравнение значений суммарного влагосодержания, выявленных по радиозондированиям в пункте Усть-Баргузин и GPS-измерениям в ближайшем пункте МКSM (Максимиха) в течение июля 2023 г., подтвердило возможность применения постоянных GPS-наблюдений для расчета индекса Нестерова с целью оценки уровня пожарной опасности лесной среды.

Среднее отклонение разницы значений точки росы по метеоданным в пункте Усть-Баргузин и GPS-измерениям в пункте IRKM (Иркутск) составило 4,5 °С, коэффициент взаимной корреляции между полученными значениями составил 0,76. Сравнение показало, что использование GPS-данных в пункте IRKM с учетом приземных данных температуры воздуха в пункте Усть-Баргузин является вполне приемлемым для нахождения индекса Нестерова. Сравнение изменений количества дней индекса Нестерова 5-го класса пожароопасности по данным GPS-наблюдений с изменениями площади выгоревших участков леса за 2013–2023 гг. показало возможность применения GPS-данных для оценки уровня опасности возгорания леса на территории Забайкальского национального парка.

Улучшение организации оперативной системы наблюдения и оповещения об уровнях пожароопасности в лесных массивах является важной задачей, поэтому запланирована установка двух метеорологических датчиков на п-ове Святой Нос. Для территории Забайкальского национального парка планируется создать специальный интернет-ресурс о комплексном показателе пожарной опасности в лесу, приземной температуре, дефиците точки росы, суммарном влагосодержании тропосферы и уровнях выпавших атмосферных осадков в режиме реального времени. Получение оперативной информации о потенциальной пожарной опасности в лесу посредством постоянного мониторинга показателя Нестерова и метеопрогноза дает возможность прогнозирования возникновения лесных пожаров и выполнения предупредительных мер для их устранения.

Список литературы

Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Болданова Е. В. Точка росы как основа оперативного показателя лесопожарной опасности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 1 (397). С. 114–125.

Детектирование перемещающихся ионосферных возмущений по данным одновременных измерений электронной концентрации, полного электронного содержания и доплеровского смещения частоты на радиофизическом комплексе ИСЗФ / Э. Л. Афраймович, Ю. Б. Башкуев, О. И. Бернгардт [и др.] // Геомagnetизм и аэрoномия. 2004. Т. 44, № 4. С. 463–475.

Иметхенов А. Б. Лесные пожары Бурятии: анализ современного состояния и некоторые рекомендации по проведению профилактических работ // Актуальные вопросы технологической безопасности : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. Улан-Удэ, 2015. С. 75–79.

Калинников В. В., Хуторова О. Г. Валидация интегрального содержания водяного пара по данным наземных измерений сигналов ГНСС // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 4. С. 58–63.

A near real time system for tropospheric monitoring using IGS hourly data / A. Flores, A. Escudero, M. J. Sedo [et al.] // Earth Planets Space. 2000. Vol. 52. P. 681–684.

Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean / J. Haase, M. Ge, H. Vendel, E. Calais // Journal of Applied Meteorology. 2003. Vol. 42. P. 1547–1548.

Bengtsson L., Hagemann S., Hodges K. I. Can climate trends be calculated from reanalysis data? // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109. P. D11111.

Bevis M., Businger S., Chriswell S. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water // Journal of Applied Meteorology. 1994. Vol. 33. P. 379–386.

Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths / J. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro [et al.] // Radio Science. 1985. Vol. 20, N 6. P. 1593–1607.

Hopfield H. S. Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // Journal of Geophysical Research. 1969. Vol. 74, N 18. P. 4487–4499.

King R. W., Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 9.9. Cambridge : Mass. Inst. of Technol., 2000

Lukhneva O. F., Dembelov M. G., Lukhnev A. V. The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data // Geodynamics and tectonophysics. 2016. Vol. 7, N 4. P. 545–553.

Wang J., Zhang L., Dai A. Global estimates of water-vapor weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol. 110. P. D21101.

Zhang F., Barriot G. X. Jean-Pierre, Hopuare M. Modeling the Slant Wet Delays from One GPS Receiver as a Series 376 Expansion with Respect to Time and Space: Theory and an Example of Application for the Tahiti Island // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2020. Vol. 58. P. 7520–7532.

References

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verkhney atmosfery Zemli* [GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, SCRRS SB RAMS Publ., 2006, 480 p. (in Russian)

Boldanova E.V. Tochka rosy kak osnova operativnogo pokazatelya lesopozharnoy opasnosti [Dew Point as a Basis for the Operational Indicator of Forest Fire Danger]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Russian Forestry Journal]. 2024, no. 1 (397), pp. 114–125. (in Russian)

Afraimovich E.L., Berngardt O.I., Shpynev B.G. et al. Detektirovanie peremeshchayushchihya ionosfernyh vozmushcheniy po dannym odnovremennyh izmereniy elektronnoy koncentracii, polnogo elektronnoygo sodержaniya i doplerovskogo smeshcheniya chastoty na radiofizicheskom komplekse ISZF [Detection of traveling ionospheric disturbances from the data of simultaneous measurements of the electron concentration, total electron content, and doppler frequency shift at the ISTP radio-physical complex]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2004, vol. 44, no. 4, pp. 423–434. (in Russian)

Imethenov A.B. Lesnye pozhary Buryatii: analiz sovremennoygo sostoyaniya i nekotorye rekomendatsii po provedeniyu profilakticheskikh rabot [Forest fires in Buryatia: analysis of the current state and some recommendations for preventive work]. *Aktualnye voprosy tehnosfernoy bezopasnosti*

[Actual Issues of Technospheric Safety]. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference. Ulan-Ude, 2015, pp. 75-79. (in Russian)

Kalinnikov V.V., Khutorova O.G. Validaciya integralnogo sodержaniya vodyanogo para po dannym nazemnyh izmerenij signalov GNSS [Validation of integrated water-vapor content from gnss data of ground-based measurements]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 352-356. (in Russian)

Flores A., Escudero A., Sedo M.J. et al. A near real time system for tropospheric monitoring using IGS hourly data. *Earth Planets Space*. 2000, vol. 52, pp. 681-684.

Haase J., Ge M., Vendel H., Calais E. Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, vol. 42, pp. 1547-1548.

Bengtsson L., Hagemann S., Hodges K.I. Can climate trends be calculated from reanalysis data? *Journal of Geophysical Research*. 2004, vol. 109, pp. D11111.

Bevis M., Businger S., Chriswell S. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, vol. 33, pp. 379-386.

Davis J., Herring T.A., Shapiro I.I. et al. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths. *Radio Science*, 1985, vol. 20, no. 6, pp. 1593-1607.

Hopfield H.S. Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 1969, vol. 74, no. 18, pp. 4487-4499.

King R.W., Bock Y. *Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 9.9*. Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 2000

Lukhneva O.F., Dembelov M.G., Lukhnev A.V. The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data. *Geodynamics and tectonophysics*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 545-553.

Wang J., Zhang L., Dai A. Global estimates of water-vapor weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications. *Journal of Geophysical Research*. 2005, vol. 110, pp. D21101.

Zhang F., Jean-Pierre Barriot G.X., Hopuare M. Modeling the Slant Wet Delays from One GPS Receiver as a Series 376 Expansion with Respect to Time and Space: Theory and an Example of Application for the Tahiti Island. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020, vol. 58, pp. 7520-7532.

Сведения об авторах

Дембелов Михаил Георгиевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, лаборатория
электромагнитной диагностики
Институт физического материаловедения
СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой, 6
e-mail: mdembelov@mail.ru

Овдин Михаил Евгеньевич

директор
Объединенная дирекция Баргузинского
государственного природного биосферного
заповедника и Забайкальского национального
парка
Россия, 671623, п. Усть-Баргузин,
ул. Ленина, 71
e-mail: ovdin@pdmr.ru

Information about the authors

Dembelov Mikhail Georgievich

Candidate of Science (Physics and
Mathematics), Senior Research Scientist,
Laboratory of Electromagnetic Diagnostics
Institute of Physical Materials Science SB RAS
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047,
Russian Federation
e-mail: mdembelov@mail.ru

Ovdin Mikhail Evgenievich

Director
Joint Directorate of Barguzin State Natural
Biosphere Reserve and Transbaikalian National
Park
71, Lenin st., Ust-Barguzin, 671623,
Russian Federation
e-mail: ovdin@pdmr.ru

Код научной специальности: 1.6.18

Статья поступила в редакцию 29.05.2024; одобрена после рецензирования 18.08.2024; принята к публикации 11.09.2024
The article was submitted May, 29, 2024; approved after reviewing August, 18, 2024; accepted for publication September, 11, 2024