

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВЛАГИ В ПОЧВЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Л.А. Трефилова, П.Г. Кобелев, В.Г. Янке

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия
trefilova@izmiran.ru

MONITORING OF THICKNESS OF SNOW COVER BASED ON THE NEUTRON COMPONENT DATA OF COSMIC RAYS

L.A. Trefilova, P.G. Kobelev, V.G. Yanke

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia
trefilova@izmiran.ru

Аннотация. Нейтронные мониторы успешно применяются для решения поставленных задач в различных сферах деятельности человека. В настоящее время разработана специальная технология, которая обеспечивает возможность измерения содержания влаги в почве и снеге в масштабе поля в режиме реального времени. Описанный метод является интегральным, т. е. усредняет эффект по площади (~10 га), определяемой пробегом нейтронов (~220 м) в нижних слоях атмосферы. Для горных районов северных стран мониторинг толщины снежного покрова особенно актуален.

Ключевые слова: нейтронные мониторы, оценка влажности, мониторинг, толщина снежного покрова.

Abstract. Neutron monitors are successfully used for solving problems in various fields of human activity: science, agriculture, forecasting (meteorology) etc. A special technology has been developed to allow the moisture content in soil and snow above to be measured on some field scale in real time. The described method is integral (i.e., it averages the effect over the area determined by the range of neutrons in the lower atmosphere, which is ~220 m, and the corresponding area is about 10 hectares). For mountain areas of northern countries, monitoring of thickness of the snow cover is of special interest.

Keywords: neutron monitors, moisture estimating, monitoring, thickness of the snow cover.

ВВЕДЕНИЕ

Для измерения динамики снежного покрова были разработаны различные детекторы, которые имеют свои сильные и слабые стороны [Pirazzini et al., 2018]. Обычные методы и инструменты мониторинга снега обеспечивают локальные измерения. Кроме того, они почти всегда дают геометрическую толщину снега, а для практических целей важно знать толщину в единицах количества вещества (в единицах водного эквивалента, в. э.). В данной работе использовались данные детектора эпитепловых нейтронов бпмЕ на основе шести борных счетчиков СНМ-15 с замедлителем нейтронов толщиной 2.5 см в составе Мобильной лаборатории космических лучей, где скорость счета составляет около 12 импульсов в секунду, что обеспечивает часовую погрешность 0.5 %.

Для автоматических измерений метеорологических параметров, необходимых для корректировки ряда данных эпитепловых нейтронов, а также для получения данных о влажности, которые помогут нам установить функциональную зависимость между вариациями эпитепловых нейтронов и количеством влаги в почве и на ее поверхности, используются данные автоматической метеостанции Vaisala WXT530.

ДАнные И ИХ КОРРЕКТИРОВКА

Поток нейтронов на уровне наблюдения подвержен первичным вариациям космических лучей, изменениям, связанным с изменениями атмосферного давления и содержания водяного пара в воздухе. Для исключения такого влияния необходимо измеренную скорость счета $N_U(t)$ скорректировать с привлечением поправочных множителей, т. е.

$$N_C(T) = N_U(T) \cdot f_P f_H / f_V. \quad (1)$$

В результате скорректированные данные $N_C(t)$ будут содержать только информацию о толщине снежного покрова и (или) содержании влаги в почве.

Барометрический эффект вторичной компоненты космического излучения — это наиболее легко учитываемый эффект. Корректирующий множитель f_P определяется как

$$f_P(t) = \exp[-\beta(P - P_0)], \quad (2)$$

где P_0 — среднее давление в пункте расположения данного детектора. Барометрический коэффициент эпитепловых нейтронов $\beta = 0.63$ %/mb зависит от конструкции детектора, поэтому его необходимо экспериментально определять индивидуально [Kobelev et al., 2011].

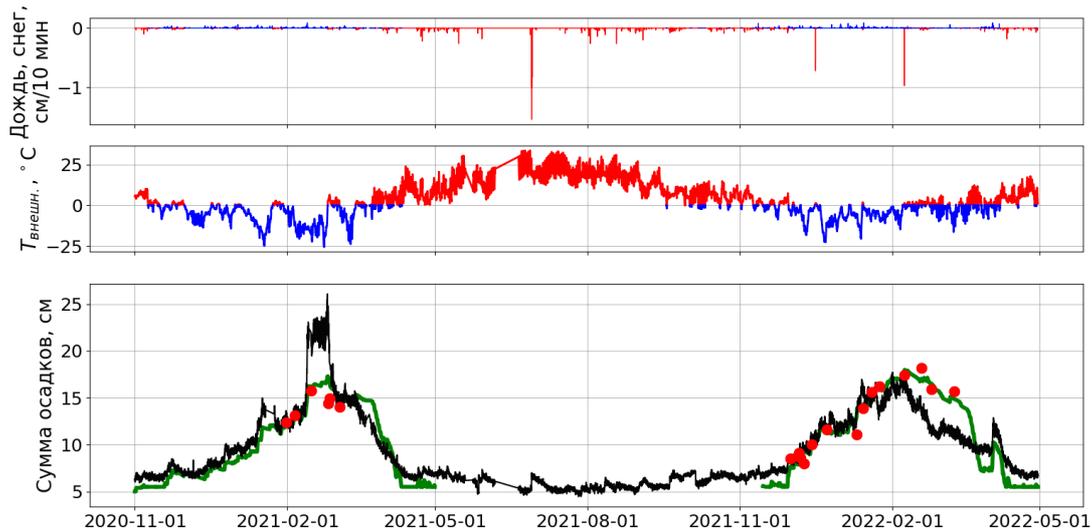
Изменения влажности воздуха для эпитепловых нейтронов для каждого момента времени определяется как [Zreda et al., 2012]

$$f_H(t) = 1 + 0.0054 \cdot [\rho(t) - \rho_{20^\circ\text{C}/50\%}], \quad (3)$$

где $\rho(t)$ — абсолютная влажность воздуха при температуре t ; $\rho_{20^\circ\text{C}/50\%} = 8.7$ г/м³ — абсолютная влажность воздуха при стандартных условиях (20 °С, 50 %), к которым приводится измеренная скорость счета. Вариации галактических космических лучей можно исключить из данных рабочего детектора с помощью корректирующего множителя как отношение скорости счета опорного детектора к его скорости счета в базовый период:

$$f_V(t) = N^S / N_{\text{base}}^S = v^S + 1, \quad (4)$$

где N_{base}^S — скорость счета опорного детектора в базовый период, который должен совпадать с базовым периодом рабочего детектора; v^S — вариации галактических лучей, наблюдаемые на опорном детекторе.



Верхняя панель — осадки в виде снега (синим) или дождя (красным); средняя панель — температура воздуха; нижняя — толщина снега: точки — контрольные гравиметрические замеры, зеленая кривая — по данным метеостанции с учетом моделирования теплового баланса, черная кривая — суммарная влага по данным детектора эпитепловых нейтронов

Опорный детектор конструктивно идентичен рабочему детектору и должен находиться вблизи него, но не подвержен влиянию влаги в почве или снега. Если условия не выполняются и привлекаются вариации некоторого удаленного детектора v^∞ , то ожидаемые вариации на опорном детекторе можно оценить как

$$v^S = \frac{C_0^\infty}{C_0^S} \cdot v^\infty, \quad (5)$$

где C_0^S и C_0^∞ — приемные коэффициенты соответствующих детекторов [<https://www.cbpf.br/~icrc2013/papers/icrc2013-0878.pdf>].

Вклад барометрического эффекта наибольший и достигает 10 %, вклад эффекта влажности в атмосфере составляет до 5 %, а вклад первичных вариаций — около 0.5 %.

Скорректированная скорость счета нейтронных детекторов преобразуется во влажность почвы и массу снега путем использования стандартной функции калибровки, предложенной в работе [Desilets et al., 2010], которая отражает обратную зависимость скорости счета от содержания влаги в верхнем слое почвы или над ней:

$$\theta = \rho_0 \frac{a_0}{\frac{N}{N_0} - a_1} - a_2 = \rho_0 \frac{a_0}{v + (1 - a_1)} - a_2, \quad (6)$$

где θ — объемное содержание влаги в почве, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_0 — объемная плотность сухого вещества, $\text{г}/\text{см}^3$; N_0 — интенсивность эпитепловых нейтронов над сухой почвой, которую необходимо калибровать с использованием эталонных данных о влажности почвы на месте; a_i — параметры модели ($a_0=0.0808$, $a_1=0.372$, $a_2=0.115$). Эти параметры были определены для общей кремнеземистой почвы, но в конкретном случае могут быть уточнены. В нашем случае (серозем) получен коэффициент $a_1=0.405$.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

В результате корректировки и калибровки мы получили итоговые данные о скорости счета детектора эпитепловых нейтронов, содержащие только информацию о толщине снежного покрова и о содержании влаги в почве. Для калибровки брались пробы снега методом зондирования, а толщина снежного покрова определялась в сантиметрах водного эквивалента (см. в.э.). Результат анализа за два зимних периода представлен на рисунке, где на верхней панели приведены осадки по данным метеостанции WXT530, разделенные на жидкую и твердую фазу осадков, на средней панели — временной температурный ход.

По данным метеостанции непрерывно определялись осадки в виде снега. При положительных температурах и под воздействием солнечной радиации (два основных тепловых потока) снег подтаивает и частично испаряется. С учетом упрощенного моделирования теплового баланса [<http://sibnigmi.ru/documents/school/Gordeev.pdf>] временная зависимость оставшегося слоя снега показана на нижней панели (зеленая кривая) вместе с несколькими контрольными гравиметрическими замерами толщины снега (красные точки).

Пытаясь максимально разделить проблему влажности почвы и снега, мы ограничились зимними периодами, когда влажность почвы практически не меняется. Ясно, что детектор эпитепловых нейтронов с разным весом чувствителен ко всей влаге — и в почве, и над ней. Экспериментально были взяты пробы грунта глубиной до 20 см. Влажность грунта в каждом замере отличалась мало, и средняя величина влаги в верхнем слое почвы составляет около 6 см в.э.

Черной кривой представлен результат мониторинга толщины снежного покрова по данным детектора эпитепловых нейтронов, вычисленный согласно (6). Этот результат сравнивается с результатом, полученным прямыми методами (синяя кривая). В це-

лом наблюдается хорошее согласие. Нужно отметить, что получены средние значения толщины снежного покрова в радиусе пробега нейтронов (около 220 м). Во второй половине февраля 2021 г. результат детектора эпитепловых нейтронов фиксирует повышение количества снега. Это связано с сильным снегопадом, после которого над детектором произошло локальное накопление снега, исказившее полученные значения. На рисунке просматривается расхождение в период после февраля–марта, небольшое в 2021 г. и существенное в 2022 г., которое сегодня не удастся доказательно объяснить. Объяснению упомянутого расхождения будет уделено особое внимание позже. В обоих случаях расхождение наблюдается в период таяния снега.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен результат непрерывного мониторинга толщины снежного покрова в зимние периоды с 2020 по 2022 г. с помощью детектора эпитепловых нейтронов, работающего в ИЗМИРАН. Результат мониторинга за исследуемый период сравнивался с результатами данных об осадках с метеостанции, откалиброванных с помощью забора снежных проб и грунта. Полученные результаты подтверждают правильность используемой методики [Zweck, 2013], а также временную стабильность детектора эпитепловых нейтронов.

Описанный метод является интегральным, т. е. усредняет эффект на площади, определяемой пробегом нейтронов в нижней атмосфере (~220 м) и примерно равной 10 га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Desilets D., Zreda M., Ferre T.P.A. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resour. Res.* 2010. Vol. 46, W11505. DOI: [10.1029/2009WR008726](https://doi.org/10.1029/2009WR008726).
- Kobelev P., Belov A., Mavromichalaki E., et al. Variations of barometric coefficients of the neutron component in the 22–23 cycles of solar activity. *Proc. 32nd ICRC.* 2011. Vol. 11. P. 382–385. DOI: [10.7529/ICRC2011/V11/0654](https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V11/0654).
- Pirazzini R., Leppänen L., Picard G., et al. European in-situ snow measurements: practices and purposes. *Sensors.* 2018. Vol. 18. 2016. DOI: [10.3390/s18072016](https://doi.org/10.3390/s18072016).
- Zreda M., Shuttleworth W.J., Xeng X., et al. The Cosmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2012. Vol. 9. P. 4505–4551. DOI: [10.5194/hessd-9-4505-2012](https://doi.org/10.5194/hessd-9-4505-2012).
- Zweck C., Zreda M., Desilets D. Snow shielding factors for cosmogenic nuclide dating inferred from monte carlo neutron transport simulations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. Vol. 379. P. 64–71. DOI: [10.1016/j.epsl.2013.07.023](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.07.023).
URL: <http://sibnigmi.ru/documents/school/Gordeev.pdf> (дата обращения 30 июля 2022 г.).
- URL: <https://www.cbpf.br/~icrc2013/papers/icrc2013-0878.pdf> (дата обращения: 30 июля 2022 г.).