

УДК 528.88

## ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ СРЕДСТВАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

А.А. Волчек<sup>1</sup> д.г.н., Д.О. Петров<sup>1</sup> к.т.н.

<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

E-mail: polegdo@gmail.com

Представлен обзор современных средств глобального мониторинга влажности почвы средствами дистанционного зондирования поверхности Земли. Рассмотрены характерные особенности применения орбитальных радиометров и радаров С, Х и L диапазонов для оценки объемной влажности почвы на глубине до 5 см и прикорневом слое растительности. Произведен обзор возможностей спутниковой гравиметрии для оценки толщины слоя грунтовых вод. Предложен ряд источников для оперативного получения оценочных данных содержания воды в почве от средств дистанционного микроволнового сканирования поверхности Земли и орбитальных гравиметрических комплексов. На основе анализа научных работ показана сложность мониторинга уровня пожарной опасности в лесных массивах и продемонстрирована перспективность оценки влажности почвы в сельскохозяйственных регионах при использовании орбитальных инструментов микроволнового диапазона, а также описана адекватность вычисления содержания влаги в грунте на глубине до одного метра средствами спутниковой гравиметрии.

**Ключевые слова:** влажность почвы, спутник, SMAP, SMOS, GRACE, GRACE-FO

Поступила 13.01.21

DOI 10.54668/2789-6323-2021-100-1-36-41

### ВВЕДЕНИЕ

Влажность почвы представляет собой важный параметр, влияющий на протекание процессов в гидрологических, климатических и экобиологических системах, учет и картографирование которого позволяет выполнять прогнозирование засух и наводнений, расчет урожайности сельскохозяйственных культур и уровня пожарной опасности. Недостатком традиционных прямых способов измерения содержания воды в почвенном слое, несмотря на высокую точность получаемых величин, является неравномерность и недостаточная густота сети измерительных станций. С другой стороны, дистанционные спутниковые методы оценки влажности почвы обеспечивают охват практически всей поверхности земного шара, но в большинстве случаев обладают низким латеральным разрешением

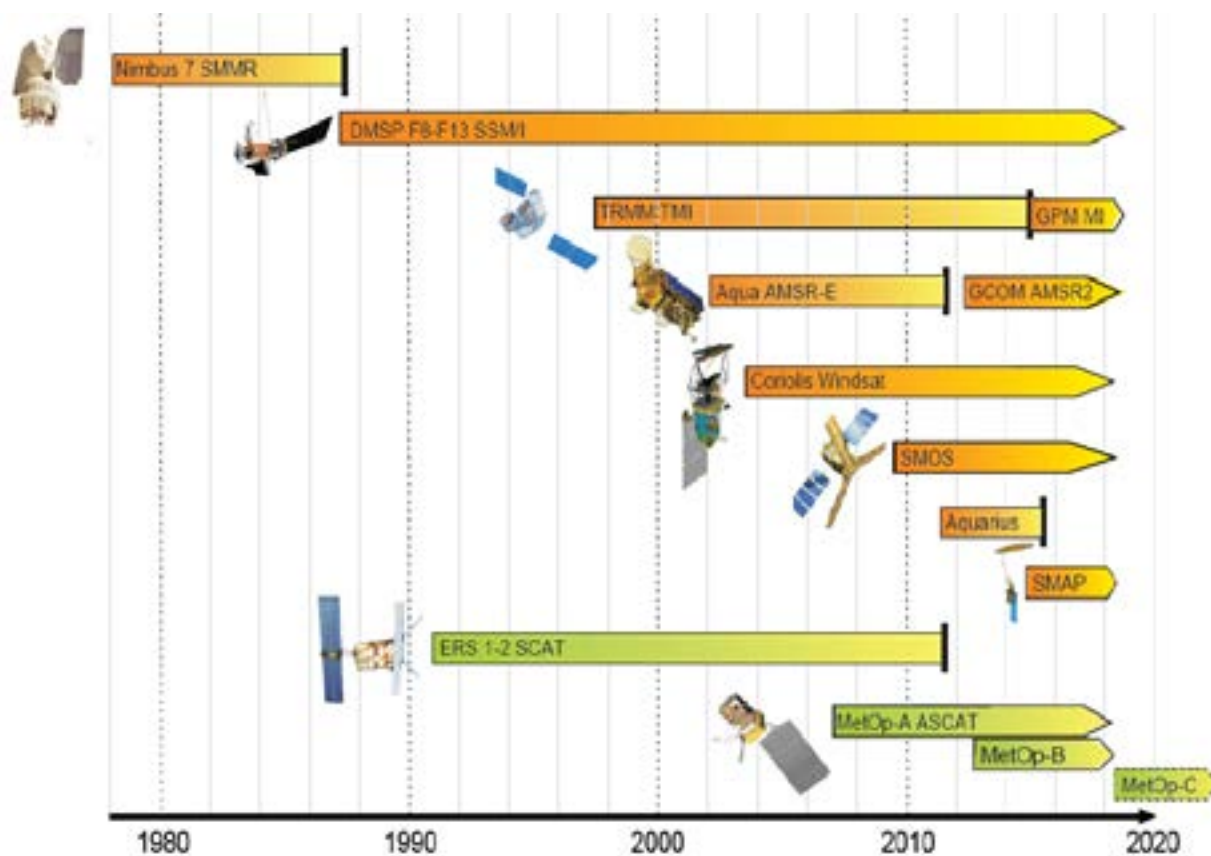
(~40 км). Несмотря на указанный недостаток, использование спутникового дистанционного зондирования позволяет обеспечивать мониторинг влагосодержания почв на территориях, которые не охвачены наземными наблюдательными постами.

Предлагаемая работа посвящена обзору современных средств спутникового мониторинга влажности почвы, источников получения измеренных величин и возможностей их практического использования.

**Средства спутникового мониторинга влажности почвы.** Исторически одним из основных инструментов дистанционной спутниковой оценки влажности почвы являются микроволновые радиометры С и Х диапазонов (от 3,4 до 8 ГГц и от 8 до 12 ГГц, соответственно) основным недостатком которых являются неудовлетворительная точность измерений при

наличии на исследуемой поверхности даже небольшого слоя растительности – на современном этапе развития средств наблюдения использование L-диапазона частот (от 1 до 2 ГГц) позволяет до определенной степени снизить влияние наземной растительности на достоверность производимых измерений [8]. На рисунке 1 при-

ведены названия спутников и установленных на их борту радиометрических инструментов с периодом их эксплуатации, изображенным в виде горизонтальной полосы, разбитых на 2 группы: верхняя группа соответствует средствам пассивного микроволнового наблюдения, а нижняя – активным.



**Рис.1.** Средства дистанционного спутникового мониторинга влажности почвы [5, 8].

Среди приведенных выше инструментов дистанционного мониторинга необходимо выделить спутник SMAP, запущенный NASA 31 января 2015 г. – на его борту установлены радиометр и радар L-диапазона взаимно дополняющие друг друга [8]. Использование радара совместно с радиометром позволяет повысить горизонтальное разрешение наблюдений до 3 км и обнаруживать процессы замерзания/оттаивания воды, содержащейся в почве. К сожалению, радар SMAP вышел из строя 7 июля 2015 г. и для исправления сложившегося положения было принято решение использовать радар С-диапазона спутников Sentinel-1A/Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA) при совпадениях траекторий их пролетов со

спутником SMAP [9]. Среди иных зарубежных микроволновых орбитальных измерительных комплексов пригодных для оценки влажности почвы следует также отметить российский спутник «Метеор-М» № 2 оборудованный радиометром МТВЗА-ГЯ [1].

В настоящее время вызывает интерес применение высокоточных измерений вариаций во времени гравитационного поля Земли при помощи орбитальных комплексов GRACE и GRACE-FO для расчета распределения поверхностных и грунтовых вод с разрешением 1° по широте и долготе [2].

**Источники получения данных мониторинга влажности почвы средствами спутникового дистанционного зондирования.** Евро-

пейское космическое агентство в рамках проекта «Climate change initiative» предоставляет открытый доступ к сводному архиву данных мониторинга влажности почвы различными средствами спутникового наблюдения, использующих инструменты микроволнового диапазона, за период времени 40 лет начиная с 01.11.1978 и заканчивая 31.12.2018 г. с ежедневной детализацией и разрешением  $0,25^\circ$  по широте и долготе [5]. Информация предоставляется после бесплатной регистрации на веб-странице, расположенной по адресу <http://www.esa-soilmoisture-cci.org>. Доступные величины объемной влажности почвы ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) представлены следующим образом: объединение измерений радиометров SMMR, SMM/I, TMI, AMSR-E, AMSR2 и SMOS за период времени с 01.11.1978 и заканчивая 31.12.2018 составляют группу «PASSIVE»; объединение измерений радаров AMI-WS и ASCAT за период времени начиная с 05.08.1991 и заканчивая 31.12.2018 г. составляют группу «ACTIVE» – влажность почвы выражена в процентах; объединение измерений всех типов инструментов микроволнового диапазона за период времени с 01.11.1978 г. и заканчивая 31.12.2018 г. составляют группу значений объемной влажности почвы «COMBINED».

Актуальные данные оценок радиометром MIRAS (спутник SMOS Европейского космического агентства) объемного содержания воды в поверхностном слое грунта (Level 2 Soil Moisture) доступны начиная с 01.06.2010 г. через службу SMOS Online Dissemination Service (<https://smos-diss.eo.esa.int/oads/access>). Спутник находится на полярной орбите и совершает 58 витков вокруг Земли в сутки – повторный пролет над одной и той же областью земной поверхности происходит максимум через трое суток, горизонтальное разрешение предоставляемых величин объемной влажности почвы ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) составляет 43 км [6]. Интерес представляют оценочные расчеты влажности почвы, выполняемые при помощи обработки искусственной нейронной сетью принятых радиометром результатов микроволнового сканирования и доступные через 4 часа после каждой половины орбитального витка спутника между полюсами Земли.

Расчетные величины объемной влажности почвы ( $\text{см}^3/\text{см}^3$ ), получаемые после обработки данных от спутника SMAP, доступны начиная с 01.04.2015 г. сайте National Snow and Ice

Data Center (<https://nsidc.org>). Оценки влажности представлены с разрешением 3 км, 9 км и 36 км тремя группами продуктов: Level 2 Soil Moisture – данные после каждой половины витка спутника по полярной орбите с частотой обновления каждые 24 часа; Level 3 Soil Moisture – охват всей земной поверхности с периодом обновления составляющим 50 часов; Level 4 Soil Moisture – значения влажности почвы в прикорневой зоне растений для всей земной поверхности с обновлением каждые 7 дней.

Ежемесячные оценки толщины слоя грунтовых вод для всей земной поверхности с разрешением  $1^\circ$  по широте и долготе (коллекция данных JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly Release 6.0), получаемые измерениями вариаций во времени гравитационного поля Земли при помощи орбитального комплекса GRACE-FO возможно получить начиная с 22/05/2018 сайте NASA Jet Propulsion Laboratory Physical Oceanography Distributed Active Archive (<https://podaac.jpl.nasa.gov>) [4].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных мониторинга влажности почвы средствами спутникового дистанционного зондирования для решения научных и практических задач вызывает несомненный интерес. Одним из очевидных применений данных о влажности является оценка уровня пожарной опасности для обширных площадей земной поверхности, охваченных редкой сетью метеорологических станций. В работе [3] авторами показывается, что измерения влажности почвы радиометром MIRAS, установленным на борту спутника SMOS (ESA), непригодны для описания динамики уровня пожарной опасности в лесных массивах, но с другой стороны результаты корреляционного анализа показывают вполне удовлетворительные результаты для безлесных площадей Красноярского края Российской Федерации (коэффициенты корреляции находятся в пределах от  $-0,45$  до  $-0,7$ ). Более обнадеживающие результаты средства микроволнового сканирования показывают при оценке влажности почв в сельскохозяйственных регионах Канады [7] – среднеквадратичная ошибка измерений при сопоставлении с наземными данными составила менее  $0,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Учитывая высокую

погрешность измерений влажности почвы для земной поверхности покрытой густой растительностью, оценки содержания воды в почве по данным гравиметрических измерений, проводимых группой спутников GRACE, показывают высокие значения коэффициента корреляции Пирсона равные 0,56 для влажности почвы на глубине от 0,5 м до 1 м на тестовых участках Северного Казахстана [2].

Результаты практического применения данных мониторинга влажности почвы средствами спутникового дистанционного зондирования показывают сильные и слабые стороны различных используемых инструментальных средств – микроволновые радиометры и радары L-диапазона позволяют проводить адекватную оценку влажности почвы на глубине до 5 см с высоким разрешением по широте и долготе обеспечивая периодичность измерений составляющую 3 дня; гравиметрические орбитальные комплексы показывают увеличение точности вычисления содержания воды с повышением глубины, но при этом разрешающая способность по широте и долготе значительно понижается а промежуток времени между последовательными измерениями увеличивается до одного месяца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Музалевский К.В., Ружичка З., Савин И.В., Захватов М.Г., Гончаров В.В., Сариев А.Х., Каравайский А.Ю. Первое применение отечественного спутника «Метеор-М» № 2 для дистанционного зондирования влажности и температуры тундровой почвы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 7. – С. 100-118.
2. Киселёв А.В., Муратова Н.Р., Горный В.И., Тронин А.А. Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 6. – С. 7-16.
3. Швецов Е.Г., Ружичка З., Миронов В.Л. Исследование применимости данных спутника SMOS для оценки уровня пожарной опасности на территории Красноярского края // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 2(48). – С. 110-115.
4. Cooley S.S., Landerer F. W. GRACE L-3 Product User Handbook // NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. – 2019. – [Электронный ресурс] URL: [https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO\\_L3\\_Handbook\\_JPL-D-103133\\_20190327.pdf](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L3_Handbook_JPL-D-103133_20190327.pdf) (дата обращения: 15.11.2019).
5. Kidd R., Haas E. Soil Moisture ECV Product User Guide (PUG). Revision 3. D3.3.1. Version 4.5 // Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC) GmbH. – 2019. – [Электронный ресурс] URL: [https://www.esa-soilmoisture-cci.org/sites/default/files/documents/public/Deliverables%20-%20CCI%20SM%20/CCI2\\_Soil\\_Moisture\\_D3.3.1\\_Product\\_Users\\_Guide\\_v4.5.pdf](https://www.esa-soilmoisture-cci.org/sites/default/files/documents/public/Deliverables%20-%20CCI%20SM%20/CCI2_Soil_Moisture_D3.3.1_Product_Users_Guide_v4.5.pdf) (дата обращения: 15.11.2019).
6. Kerr Y.H., Al-Yaari A., Rodriguez-Fernandez N., Parrens M., Molero B., Leroux D., Bircher S., Mahmoodi A., Mialon A., Richaume P., Delwart S., Al-Bitar A., Pellarin T., Bindlish R., Jackson T.J., Rüdiger C., Waldteufel P., Mecklenburg S., Wigneron J.-P. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation // Remote Sensing of Environment. – 2016. – № 180. – P. 40-63.
7. Champagne C., Rowlandson T., Berg A., Burns T., L'Heureux J., Tetlock E., Adams J.R., McNairn H., Toth B., Itenfisu D. Satellite surface soil moisture from SMOS and Aquarius: Assessment for applications in agricultural landscapes // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2016. – № 45. – P. 143-154.
8. Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P.E., Kellogg K.H., Allen A., Bindlish R., Brown M., Chan S., Colliander A., Crow W.T., Das N., Dunbar R.S., Edelstein W.N., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Jai B., Johnson J., Kim E., Kim S., Kimball J., Koster R.D., Leon A., McDonald K.C., Moghaddam M., Mohammed P., Moran S., Njoku E.G., Piepmeier J.R., Reichle R., Rogez F., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Van Zyl J., Weiss B., West R. SMAP Handbook. Soil Moisture Active Passive. Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space [Электронный ресурс] // National Aeronautics and Space Administration. – 2014. – URL: [https://smap.jpl.nasa.gov/system/internal\\_resources/details/original/178\\_SMAP\\_Handbook\\_FINAL\\_1\\_JULY\\_2014\\_Web.pdf](https://smap.jpl.nasa.gov/system/internal_resources/details/original/178_SMAP_Handbook_FINAL_1_JULY_2014_Web.pdf) (дата обращения: 15.11.2019).
9. Das N.N., Entekhabi D., Dunbar R.S., Chaubell M.J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W., O'Neill P.E., Walker J.P., Berg A., Bosch D.D., Caldwell T., Cosh M.H.,

Collins C.H., Lopez-Baeza E., Thibeault M. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product // Remote Sensing of Environment. – 2019. – №. 233. – 111380.

## REFERENCE

1. Muzalevskii K.V., Ruzhichka Z., Savin I.V., Zakhvatov M.G., Goncharov V.V., Sariev A., Karavaiskii A.Yu. Pervoe primeneniye otechestvennogo sputnika «Meteor-M» № 2 dlya distantsionnogo zondirovaniya vlazhnosti i temperatury tundrovoi pochvy // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2017. – T. 14, № 7. – S. 100-118.
2. Kiselev A.V., Muratova N.R., Gornyi V.I., Tronin A.A. Svyaz' zapasov produktivnoi vlagi v pochve s polem sily tyazhesti Zemli (po dannym s»emok sputnikami GRACE) // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2015. – T. 12, № 6. – S. 7-16.
3. Shvetsov E.G., Ruzhichka Z., Mironov V.L. Issledovanie primenimosti dannykh sputnika SMOS dlya otsenki urovnya pozharnoi opasnosti na territorii Krasnoyarskogo kraya // Vestnik SibGAU. – 2013. – № 2(48). – S. 110-115.
4. Cooley S.S., Landerer F.W. GRACE L-3 Product User Handbook // NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. – 2019. – [Elektronnyi resurs] URL: [https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO\\_L3\\_Handbook\\_JPL-D-103133\\_20190327.pdf](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L3_Handbook_JPL-D-103133_20190327.pdf) (data obrashcheniya: 15.11.2019).
5. Kidd R., Haas E. Soil Moisture ECV Product User Guide (PUG). Revision 3. D3.3.1. Version 4.5 // Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC) GmbH. – 2019. – [Elektronnyi resurs] URL: [https://www.esa-soilmoisture-cci.org/sites/default/files/documents/public/Deliverables%20-%20CCI%20SM%202/CCI2\\_Soil\\_Moisture\\_D3.3.1\\_Product\\_Users\\_Guide\\_v4.5.pdf](https://www.esa-soilmoisture-cci.org/sites/default/files/documents/public/Deliverables%20-%20CCI%20SM%202/CCI2_Soil_Moisture_D3.3.1_Product_Users_Guide_v4.5.pdf) (data obrashcheniya: 15.11.2019).
6. Kerr Y.H., Al-Yaari A., Rodriguez-Fernandez N., Parrens M., Molero B., Leroux D., Bircher S., Mahmoodi A., Mialon A., Richaume P., Delwart S., Al-Bitar A., Pellarin T., Bindlish R., Jackson T.J., Rüdiger C., Waldteufel P., Mecklenburg S., Wigneron J.-P. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation // Remote Sensing of Environment. – 2016. – № 180. – P. 40-63.
7. Champagne C., Rowlandson T., Berg A., Burns T., L'Heureux J., Tetlock E., Adams J.R., McNairn H., Toth B., Itenfisu D. Satellite surface soil moisture from SMOS and Aquarius: Assessment for applications in agricultural landscapes // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2016. – № 45. – P. 143-154.
8. Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P.E., Kellogg K.H., Allen A., Bindlish R., Brown M., Chan S., Colliander A., Crow W.T., Das N., Dunbar R.S., Edelstein W.N., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Jai B., Johnson J., Kim E., Kim S., Kimball J., Koster R.D., Leon A., McDonald K.C., Moghaddam M., Mohammed P., Moran S., Njoku E.G., Piepmeier J.R., Reichle R., Rogez F., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Van Zyl J., Weiss B., West R. SMAP Handbook. Soil Moisture Active Passive. Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space [Elektronnyi resurs] // National Aeronautics and Space Administration. – 2014. – URL: [https://smap.jpl.nasa.gov/system/internal\\_resources/details/original/178\\_SMAP\\_Handbook\\_FINAL\\_1\\_JULY\\_2014\\_Web.pdf](https://smap.jpl.nasa.gov/system/internal_resources/details/original/178_SMAP_Handbook_FINAL_1_JULY_2014_Web.pdf) (data obrashcheniya: 15.11.2019).
9. Das N.N., Entekhabi D., Dunbar R.S., Chaubell M.J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W., O'Neill P.E., Walker J.P., Berg A., Bosch D.D., Caldwell T., Cosh M.H., Collins C.H., Lopez-Baeza E., Thibeault M. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product // Remote Sensing of Environment. – 2019. – №. 233. – 111380.

## **ЖЕР БЕТІН ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДЫЛАУ ҚҰРАЛДАРЫМЕН ТОПЫРАҚ ЫЛҒАЛДЫЛЫҒЫНЫҢ ЖАҒАНДЫҚ МОНИТОРИНГІ ДЕРЕКТЕРІНІҢ КӨЗДЕРІ**

**А.А. Волчек**<sup>1</sup> геогр. ғылымд. докторы, **Д.О. Петров**<sup>1</sup> техн. ғылымд. кандидаты

*<sup>1</sup>Брест мемлекеттік техникалық университеті, Брест, Беларусь Республикасы  
E-mail: polegdo@gmail.com*

Жер бетін қашықтықтан зондылау құралдарымен топырақ ылғалдылығының жаһандық мониторингінің заманауи құралдарына шолу жасалды. 5 см тереңдікте және өсімдіктердің тамыр қабатында топырақтың көлемді ылғалдылығын бағалау үшін орбитальды радиометрлер мен С, Х және L диапазондарындағы радарларды қолданудың сипаттамалық ерекшеліктері қарастырылады. Жер асты сулары қабатының қалыңдығын бағалау үшін спутниктік гравиметрияның мүмкіндіктеріне шолу жасалды. Жер бетін қашықтықтан микротолқынды сканерлеу құралдарынан және орбиталық гравиметриялық кешендерден топырақтағы су құрамының бағалау деректерін жедел алу үшін бірқатар дереккөздер ұсынылды. Ғылыми жұмыстарды талдау негізінде орман алқаптарындағы өрт қауіптілігі деңгейін мониторингтеудің күрделілігі көрсетілді және микротолқынды диапазондағы орбиталық құралдарды пайдалану кезінде ауыл шаруашылығы өңірлеріндегі топырақ ылғалдылығын бағалаудың дамыту келешегі көрсетілді, сондай-ақ спутниктік гравиметрия құралдарымен бір метрге дейінгі тереңдікте топырақтағы ылғал құрамын есептеудің адекваттығы сипатталды.

**Түйін сөздер:** топырақ ылғалдылығы, жер серігі, SMAP, SMOS, GRACE, GRACE-FO

### **SOURCES OF GLOBAL SCALE SOIL MOISTURE MONITORING DATA BY SATELLITE BASED REMOTE SENSING OF EARTH'S SURFACE**

**A.A. Volchek**<sup>1</sup> doctor of geographical Sciences, **D.O. Petrov**<sup>1</sup> candidate of technical sciences

*<sup>1</sup>Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus  
E-mail: polegdo@gmail.com*

A review of modern tools of global monitoring of soil moisture by means of remote sensing of the Earth's surface is presented. The characteristic features of the use of orbital radiometers and radars of C, X and L microwave bands for estimating the volumetric soil moisture at a depth of 5 cm and the root layer of vegetation are considered. A review of the capabilities of satellite gravimetry to assess the land water equivalent thickness is made. A number of sources have been proposed for obtaining estimates of soil water content from satellite based radiometric devices and orbital gravimetric systems. Based on the analysis of scientific research papers, the complexity of monitoring the level of fire danger indices in forests is shown, and the prospects of assessing soil moisture in agricultural regions using microwave orbital instruments are demonstrated, and the adequacy of calculating the moisture content in soil at a depth of up to one meter using satellite gravimetry is described.

**Key words:** soil moisture, satellite, SMAP, SMOS, GRACE, GRACE-FO