

ВОПРОСЫ ВАЛИДАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ НАЗЕМНО-БОРТОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

© 2023 Г. Р. Бабаева , Р. М. Рагимов 

Национальное аэрокосмическое агентство, ул. С.С. Ахундова, стр. 1, г. Баку, AZ1115, Азербайджанская Республика. E-mail: gulshen.babayeva@gmail.com

Контактные точечные полевые измерения почвенной влажности отличаются невысокой производительностью; их реальной альтернативой, обеспечивающей высокую эффективность мониторинга, являются дистанционные методы определения. Известные микроволновые методы дистанционного определения влажности почвы имеют низкое пространственное разрешение, являются дорогостоящими и непригодными для использования в целях сельского хозяйства. В статье для определения влажности почвы предлагается наземно-бортовой комплекс, включающий в себя бортовой пассивный измеритель отраженного от почвы оптического сигнала и наземный контактный измеритель, функцию которого может выполнять либо автоматическая измерительная сеть, либо оператор, проводящий контактные измерения. Авторами сформулирована и решена задача оценки точности валидации результатов бортового измерения влажности почвы в системе наземно-бортовых измерений. В качестве бортового измерителя используется спектрометр пассивного излучения почвы, освещенной Солнцем, а в качестве наземного – контактный измеритель, с помощью которого оценивается влажность почвы при разных пространственных шагах. Проанализированы валидационные показатели наземных измерений и их взаимосвязь с величиной влажности почвы. Сопоставление результатов наземных и бортовых измерений позволило определить взаимосвязь между влажностью почвы, измеренной с борта, и погрешностью наземных измерений в виде погрешности валидации.

Ключевые слова: почва; влажность; наземно-бортовые измерения; спектрометр; валидация

Цитирование: Бабаева Г.Р., Рагимов Р.М. Вопросы валидации результатов при наземно-бортовом спектральном определении влажности почвы // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 1. e202. DOI: [10.31251/pos.v6i1.202](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.202).

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что влажность почвы является важным фактором, стимулирующим высокую продуктивность растениеводства. Это обуславливает необходимость принятия технических мер по повышению достоверности методов, применяемых для измерения почвенной влажности. Такие измерения традиционно проводились в полевых условиях, используя различные контактные методы, к которым, в первую очередь, следует отнести гравиметрические, рефлектометрические и радиочастотные (емкостные) методы. Вместе с тем, контактные точечные полевые измерения отличаются невысокой производительностью. Реальной альтернативой, обеспечивающей высокую эффективность мониторинга, являются дистанционные методы определения влажности почвы. Известные микроволновые методы дистанционного определения влажности имеют низкое пространственное разрешение и являются дорогостоящими и непригодными для использования в целях сельского хозяйства. Как было показано в ряде работ (Heathman et al., 2012; Merlin, Jacob et al., 2012; Merlin, Rudiger et al., 2012), в среднем инфракрасном диапазоне, в пределах 1,5÷2,5 мкм, могут быть проведены достаточно информативные дистанционные измерения влажности почвы. Однако, по трудозатратам такие измерения уступают методам зондирования в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В диапазоне электромагнитных волн 950 нм происходит их поглощение влагой, имеющейся в почве, что позволяет проводить дистанционное зондирование для определения влажности почвы. В целом, понятие «дистанционное зондирование» включает комплекс мер, предназначенных для получения достоверных оценок какого-либо физического процесса или параметра, находящегося вне досягаемости измерителя. К таким мерам относятся (Jackson et al., 2018; Das et al., 2019):

- ✓ Правильный выбор зондирующего сигнала. Для электромагнитного сигнала это означает выбор длины волны, мощности, длительности импульса и др.;
- ✓ Проведение калибровочных и валидационных измерений;
- ✓ Разработка алгоритма дешифровки результата зондирования и его сопоставления с результатом валидационных измерений.

Используемый для определения влажности почвы наземно-бортовой комплекс включает в себя бортовой пассивный измеритель отраженного от почвы оптического сигнала и наземный контактный измеритель, функцию которого может выполнять либо автоматическая измерительная сеть, либо оператор, проводящий контактные измерения. Общая схема наземно-бортовых измерений влажности почвы приведена на рисунке 1.

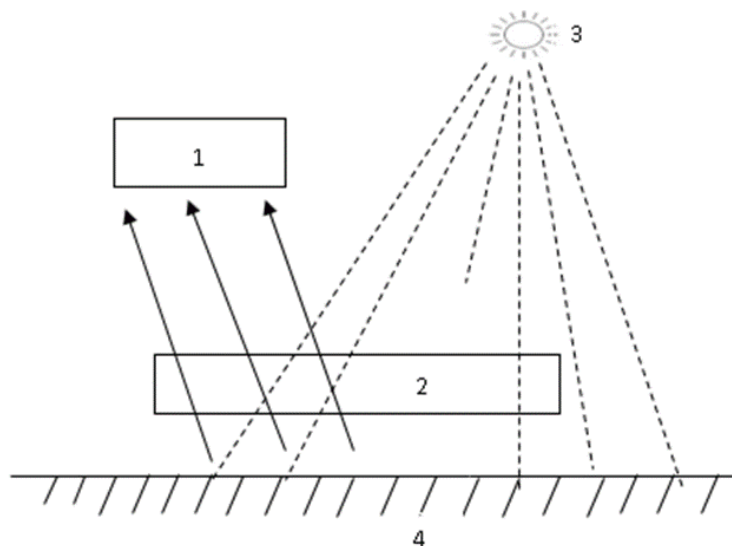


Рисунок 1. Общая схема проведения наземно-бортовых измерений влажности почвы. Цифрами обозначены: 1 – бортовой измеритель; 2 – наземный измеритель; 3 – внешний излучатель (Солнце); 4 – Земля.

Главной функцией спектрометрического устройства, установленного на борту носителя (1), является максимально информативное использование формируемого спектра отражения для дистанционной оценки содержания влаги в почве. Так, например, согласно Е. Muller, Н. Decamps (2001), существует следующая экспоненциальная зависимость между сигналом отражения от влажной почвы и количеством влаги в почве:

$$\rho(\lambda) = \rho_0(\lambda) \exp(a_\lambda \cdot M), \quad (1)$$

где $\rho(\lambda)$ – отраженный сигнал от почвы с длиной волны λ ; $\rho_0(\lambda)$ – отраженный сигнал от почвы при сухой погоде; a_λ – коэффициент ослабления почвой сигнала отражения из-за наличия в почве влаги; M – объемное содержание влаги в почве.

Из выражения (1) получим:

$$M = \frac{1}{a_\lambda} \ln\left(\frac{\rho(\lambda)}{\rho_0(\lambda)}\right) \quad (2)$$

Как отмечается в работе А.-К. Ahlmer et al. (2018), влажность почвы изменяется как по вертикали, так и по горизонтали, а, следовательно, изменяется по объему самой почвы. Все это влияет на выбор метода измерения. Некоторые методы дистанционного зондирования позволяют определить влажность только поверхностного слоя почвы, а в качестве меры влагосодержания используется отношение объема влаги к объему почвы. Методы дистанционного зондирования выгодны тем, что позволяют охватить большие участки исследуемой территории. Вместе с тем, относительно низкое пространственное и временное разрешение, а также возможность блокирования сигнала облачным покрытием, ограничивают сферу применения методов дистанционного зондирования в гидрологических целях. Важнейшим показателем при проведении гидрологических измерений методами дистанционного зондирования является вопрос о достоверности полученных результатов. Следовательно, возникает следующий вопрос: при какой величине влажности почвы результаты дистанционного зондирования оказываются наиболее достоверными? Для решения данного вопроса нами предлагается метод сопоставления результатов наземных и бортовых измерений.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

В качестве данных наземных экспериментальных измерений воспользуемся данными, изложенными в работе J.S. Famiglietti et al. (2008), где результаты наземных измерений влажности почвы представлены в виде коэффициента вариации, определяемого как

$$CV = \frac{\sigma}{M} \quad (3)$$

где CV – коэффициент вариации; σ – среднее квадратическое отклонение; M – влажность почвы в единицах объемного содержания влаги в образце.

Согласно J.S. Famiglietti et al. (2008), между CV и M была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$CV = k_1 \cdot \exp(-k_2 M) \quad (4)$$

где k_1, k_2 – модельные параметры.

Следует отметить, что наземные измерения в исследовании R.S. Dunbar et al. (2018) были проведены с различным пространственным шагом, величина которого изменялась в пределах 2,5 м ÷ 50 км. Значения k_1 и k_2 , в зависимости от пространственного шага, приведены в таблице (Famiglietti et al., 2008).

Таблица

Значения k_1 и k_2 в зависимости от пространственного шага (Famiglietti et al., 2008)

Пространственный шаг измерений	k_1	k_2
2,5 м	0,7803	9,0607
16 м	0,7287	7,3796
100 м	0,8941	8,0774
800 м	0,8840	5,8070
1,6 км	1,2070	7,1128
50 км	1,0429	5,2212

Как видно из данных таблицы, с ростом пространственного шага k_1 имеет общую тенденцию роста, в то время как k_2 имеет тенденцию к уменьшению.

Графики вычисленных значений коэффициента вариации (CV) приведены на рисунке 2 (Famiglietti et al., 2008).

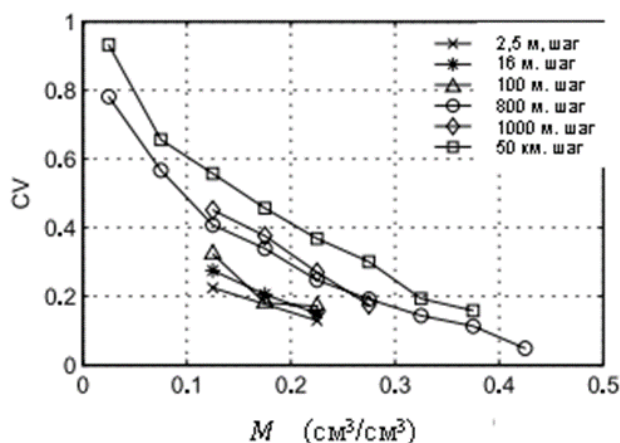


Рисунок 2. Графики значений коэффициента вариации (CV), вычисленных при разных величинах пространственного шага (Famiglietti et al., 2008).

С учетом (3) и (4) получим:

$$CV = k_1(r) \exp\left(-k_2(r) \frac{\sigma}{CV}\right) \quad (5)$$

где CV – коэффициент вариации; k_1, k_2 – модельные параметры; r – пространственный шаг; σ/CV – объемное содержание влаги в почве.

Логарифмируя (5) получаем:

$$\ln CV = \ln k_1(r) - k_2(r) \frac{\sigma}{CV} \quad (6)$$

Из (6) находим:

$$k_2(r) \frac{\sigma}{CV} = \ln \frac{k_1(r)}{CV} \quad (7)$$

или

$$\sigma = \frac{CV}{k_2(r)} \ln \frac{k_1(r)}{CV} \quad (8)$$

Исследуем (8) на экстремум от CV имеем:

$$\sigma'_{CV} = \ln \frac{k_1(r)}{CV} - CV \quad (9)$$

Из (9) получаем:

$$\ln \frac{k_1}{CV} = 1$$

или

$$\frac{k_1(r)}{CV} = e, \quad \text{где } e \approx 2,73 \quad (10)$$

С учетом (3) и (10) находим:

$$\frac{k_1(r)M}{\sigma} = e \quad (11)$$

или

$$M = \frac{\sigma e}{k_1(r)} \quad (12)$$

Следовательно, при выполнении условия (12) значение σ достигает максимума, т.е. составляет:

$$M = \frac{\sigma_{max} e}{k_1(r)} \quad (13)$$

Если принять $\frac{e}{k_1(r)} \approx const$, то, согласно (12), с ростом σ значение M , при котором σ достигает максимальной величины будет смещаться вправо. Эта картина хорошо прослеживается на графиках, представленных на рисунке 3 (Famiglietti et al., 2008).

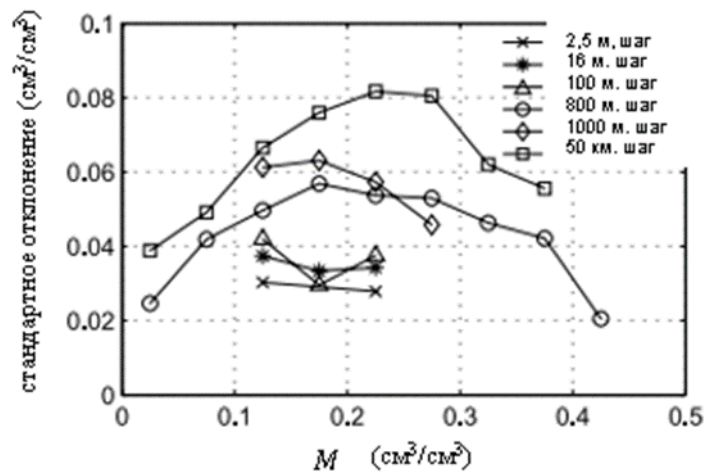


Рисунок 3. Зависимость среднеквадратического отклонения (σ) от объемного содержания влаги в почве (M) при разных значениях пространственного шага (Famiglietti et al., 2008).

С учетом вышеизложенного рассмотрим вопрос о том, при каких значениях $k_1(r)$ или r , значение $\gamma = \frac{\rho(\lambda)}{\rho_0(\lambda)}$ может иметь максимальную величину среднеквадратического отклонения при сопоставлении результатов проведенных дистанционных и наземных измерений влажности почвы. С учетом выражений (2) и (12) получим:

$$\frac{\sigma_{max} e}{k_1(r)} = \frac{1}{a_\lambda} \ln \gamma \quad (14)$$

Из (14) находим:

$$\sigma_{max} = \frac{k_1(r)}{ea_\lambda} \ln \gamma \quad (15)$$

Отметим, что уравнение (14) подразумевает проведение наземно-бортовых измерений влажности почвы при условии, что валидация результатов бортовых измерений по формуле (2) осуществляется по методике, изложенной в работе N.N. Das et al. (2019), т.е. используя полученную здесь формулу (12). Смысл уравнения (15) заключается в том, что при выполнении этого условия показатель γ будет иметь максимальное среднеквадратическое отклонение сопоставления результатов бортовых и наземных измерений, в зависимости от значения $k_1(r)$ при $a_\lambda = \text{const}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено решение задачи оценки точности валидации результатов бортового измерения влажности почвы. В качестве бортового измерителя используется спектрорадиометр пассивного излучения почвы, освещенной Солнцем, а валидация результатов дистанционных измерений осуществляется с помощью наземного контактного измерителя, при проведении измерений с разным пространственным шагом. Проанализированы статистические показатели точности наземных измерений и установлена их взаимосвязь с дистанционно измеренной величиной влажности почвы. Сопоставление результатов наземных и бортовых измерений позволило определить погрешность валидации, осуществляемой при помощи системы наземно-бортовых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- Ahlmer A.-K., Cavalli M., Hansson K., Koutsouris A.J., Crema S., Kalantari Z. Soil moisture remote-sensing applications for identification of flood-prone areas along transport infrastructure // *Environmental Earth Sciences*. 2018. 77. 533. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7704-z>.
- Das N.N., Entekhabi D., Dunbar S., Chaubell J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W.T., O'Neill P.E., Walker J., Berg A., Bosch D., Caldwell T., Cosh M., Collins C.H., LopezBaeza E., Thibeault M. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 233. 111380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.
- Dunbar R.S., Kim S., Yueh S., Colliander A., O'Neill P. E., Jackson T., Jagdhuber T., Chen F., et al. SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center DAAC: Boulder, CA, USA, 2018.
- Famiglietti J.S., Ryu D., Berg A.A., Rodell M., Jackson T.J. Field observations of soil moisture variability across scales // *Water resources research*. 2008. Vol. 44. W01423. DOI: 10.1029/2006WR005804. <https://doi.org/10.1029/2006WR005804>.
- Heathman G.C., Cosh M.H., Han E., Jackson T.J., McKee L.G., McAfee S. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks // *Geoderma*. 2012. Vol. 170. P. 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.004>.
- Merlin O., Jacob F., Wigneron J.P., Walker J.P., Chehbouni G. Multidimensional disaggregation of land surface temperature using high-resolution red, near-infrared, shortwave-infrared and microwave-L bands // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1864–1880. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2169802.
- Merlin O., Rudiger C., Bitar A., Richaume A. Disaggregation of SMOS soil moisture in Southeastern Australia // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1556–1571. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175000.
- Muller E., Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 76. Iss. 2. P. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00198-X).
- Jackson T., O'Neill P., Chan S., Bindlish R., Colliander A., Chen F., Dunbar S., Piepmeier J., Misra S., Cosh M., Caldwell T., Walker J., Wu X., Berg A., Rowlandson T., Pacheco A., McNairn H., Thibeault M., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Lopez-Baeza E., Udall F., Seyfried M., Bosch D., Starks P., Holifield C., Prueger J., Su Z., van der Velde R., Asanuma J., Palecki M., Small E., Zreda M., Calvet J., Crow W., Kerr Y., Yueh S., Entekhabi D. Soil Moisture Active Passive (SMAP) Project: Calibration and Validation for the L2/3_SM_P Version 5 and L2/3_SM_P_E Version 2 Data Products. Jet Propulsion Laboratory California Institute of

Technology, National Aeronautics and Space Administration. Vol. JPL D-56297. Pasadena: California Institute of Technology, 2018. 44 p.

Поступила в редакцию 07.02.2023

Принята 29.03.2023

Опубликована 30.03.2023

Сведения об авторах:

Бабаева Гюльшен Рауф гызы – старший научный сотрудник Национального аэрокосмического агентства (г. Баку, Азербайджанская Республика); gulshen.babayeva@gmail.com

Рагимов Рауф Махмуд оглы – кандидат технических наук, главный научный сотрудник Национального аэрокосмического агентства (г. Баку, Азербайджанская Республика); rauffmahmud@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ASSESSING THE ACCURACY INDICATORS OF THE GROUND-BASED SPECTRAL ESTIMATION OF SOIL MOISTURE

© 2023 G. R. Babaeva , R. M. Rahimov 

National Aerospace Agency, AZ 1145, S.S. Akhundov str. 1., Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: gulshen.babayeva@gmail.com

Contact point field measurements of soil moisture are characterized by low productivity. High efficiency of determining and monitoring soil moisture can be achieved remote sensing. The known microwave methods for remote determination of soil moisture have low spatial resolution, are expensive and hence unsuitable for the use in agriculture. For estimating soil moisture content, the article proposes the ground-based on-board complex, which includes an on-board passive meter of the optical signal reflected from the soil and a ground contact meter. Operation of the latter can be performed either by an automatic measuring network or by an operator conducting contact measurements. The authors formulated and solved the problem related to assessing the accuracy of validation of the on-board measurement of soil moisture content. As an on-board meter, a passive radiation spectroradiometer of the soil illuminated by the Sun is used, and as a ground meter, a contact meter is used for estimating soil moisture at different spatial increments. The accuracy indicators of ground measurements and their relationship with the estimated values were analyzed. Comparison of the results obtained by the ground and on-board measurements allowed to determine the relationship between the moisture content measured from the board and the error of ground measurements as a validation error.

Key words: moisture content; ground-based measurements; validation; soil; spectroradiometer

How to cite: Babaeva G.R., Rahimov R.M. Assessing the accuracy indicators of the ground-based spectral estimation of soil moisture // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(1). e202. DOI: [10.31251/pos.v6i1.202](https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.202). (in Russian with English abstract).

REFERENCES

Ahlmer A.-K., Cavalli M., Hansson K., Koutsouris A.J., Crema S., Kalantari Z. Soil moisture remote-sensing applications for identification of flood-prone areas along transport infrastructure. *Environmental Earth Sciences*. 2018. 77. 533. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7704-z>.

Das N.N., Entekhabi D., Dunbar S., Chaubell J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W.T., O'Neill P.E., Walker J., Berg A., Bosch D., Caldwell T., Cosh M., Collins C.H., LopezBaeza E., Thibeault M. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 233. 111380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.

Dunbar R.S., Kim S., Yueh S., Colliander A., O'Neill P. E., Jackson T., Jagdhuber T., Chen F., et al. SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center DAAC: Boulder, CA, USA, 2018.

Famiglietti J.S., Ryu D., Berg A.A., Rodell M., Jackson T.J. Field observations of soil moisture variability across scales. *Water resources research*. 2008. Vol. 44. W01423. <https://doi.org/10.1029/2006WR005804>.

Heathman G.C., Cosh M.H., Han E., Jackson T.J., McKee L.G., McAfee S. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks. *Geoderma*. 2012. Vol. 170. P. 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.004>.

Merlin O., Jacob F., Wigneron J.P., Walker J.P., Chehbouni G. Multidimensional disaggregation of land surface temperature using high-resolution red, near-infrared, shortwave-infrared and microwave-L bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1864–1880. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2169802.

Merlin O., Rudiger C., Bitar A., Richaume A. Disaggregation of SMOS soil moisture in Southeastern Australia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50. Iss. 5. P. 1556–1571. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175000.

Muller E., Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 76. Iss. 2. P. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00198-X).

Jackson T., O'Neill P., Chan S., Bindlish R., Colliander A., Chen F., Dunbar S., Piepmeier J., Misra S., Cosh M., Caldwell T., Walker J., Wu X., Berg A., Rowlandson T., Pacheco A., McNairn H., Thibeault M., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Lopez-Baeza E., Udall F., Seyfried M., Bosch D., Starks P., Holifield C., Prueger J., Su Z., van der Velde R., Asanuma J., Palecki M., Small E., Zreda M., Calvet J., Crow W., Kerr Y., Yueh S., Entekhabi D. Soil Moisture Active Passive (SMAP) Project: Calibration and Validation for the L2/3_SM_P Version 5 and L2/3_SM_P_E Version 2 Data Products. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, National Aeronautics and Space Administration. Vol. JPL D-56297. Pasadena: California Institute of Technology, 2018. 44 p.

Received 07 February 2023

Accepted 29 March 2023

Published 30 March 2023

About the authors:

Babaeva Gulshen Rauf gizi – Senior Researcher, National Aerospace Agency (Baku, Azerbaijan Republic); gulshen.babayeva@gmail.com

Rahimov Rauf Mahmud oglu – Candidate of Science in Technical, Principal Researcher, National Aerospace Agency (Baku, Azerbaijan Republic); rauffmahmud@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)