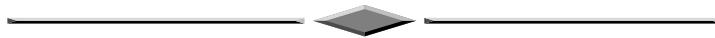


ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ



УДК 528.831.1:535.214.4:535.33/.34

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-7-15

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В МОРСКИХ ВОДАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ СО СРЕДНИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Сима Аждар кызы Аскерова

Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, Az 1115, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С. С. Ахундова, 1, корпус 2, ведущий научный сотрудник, тел. 9940125623146, e-mail: askerovasima88@mail.ru

Рена Омар кызы Гусейнова

Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Az 1073, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. А. Султановой, 11, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем, тел. 9940125309899, e-mail: renahuseynova55@gmail.com

Статья посвящена анализу информативности дистанционного зондирования взвешенных частиц в морских водах при использовании спектрорадиометров со средним пространственным разрешением. Отмечается, что межкалибровочные зависимости выходных показателей рассматриваемых спектрорадиометров среднего разрешения существенно различны, что указывает на необходимость разработки общей методологии при проведении сравнения их информационных характеристик. Сформулирована и решена задача сравнительного исследования информативности спектрорадиометров среднего разрешения при использовании их для оценки концентрации взвешенных твердых частиц в береговых водах морей и океанов. Согласно предлагаемому решению оптимальной межкалибровочной функцией является такая функция, при которой интегрированная величина разности показателей информативности сенсоров достигает минимума. Получено инвариантное условие, характеризующее функцию межкалибровки сравниваемых спектрорадиометров, при выполнении которого информативности измерителей минимально различны.

Ключевые слова: информативность, взвешенные частицы, оптимизация, калибрация, морские воды, спектрорадиометр.

Введение

Качество береговых вод определяется рядом физических показателей, одним из которых является общее количество взвешенных частиц [1–5]. Концентрация взвешенных частиц в море исследуется такими спектрорадиометрами, как MERIS [6], MODIS [7], SeaWiFS [3], а также сенсорами с высоким разрешением –

SPOT [8], IKONOS [4], WV2 [9] с пространственным разрешением 0,5–4,0 м, по сравнению с предыдущими, имеющими пространственное разрешение 250–300 м.

В то же время общее количество взвешенных частиц является непостоянной величиной даже в пределах одного пикселя и при размерах пикселя 250 м на объекте изменение этого показателя в пределах одного пикселя может достичь 7 мг/л [10], а при размерах пикселя 1 000 м изменчивость этого показателя достигает 10 мг/л. Указанный факт определяет актуальность проведения сравнения информативности спектрорадиометров с низкими пространственными разрешениями при исследовании взвешенных твердых частиц в береговых морских водах.

Предлагаемый метод

Исследования, проведенные в [11], показали, что общее количество взвешенных частиц (далее обозначается как TSS) применительно к MODIS-Aqua, LANDSAT-8 и WV-2 могут быть определены соответственно как

$$TSS = \frac{23,47 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)}{1 - 0,69 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)}; \quad (1)$$

$$TSS = \frac{25,34 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)}{1 - 0,69 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)}; \quad (2)$$

$$TSS = \frac{26,37 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)}{1 - 0,69 \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)}; \quad (3)$$

где $x = \frac{-g_1 + \sqrt{g_1^2 + 4g_2 r_{rs}(\lambda)}}{2g_2};$

$r_{rs}(\lambda) = r_{rs}$ (канал 1) для MODIS-Aqua;

r_{rs} (канал 4) для Landsat-8;

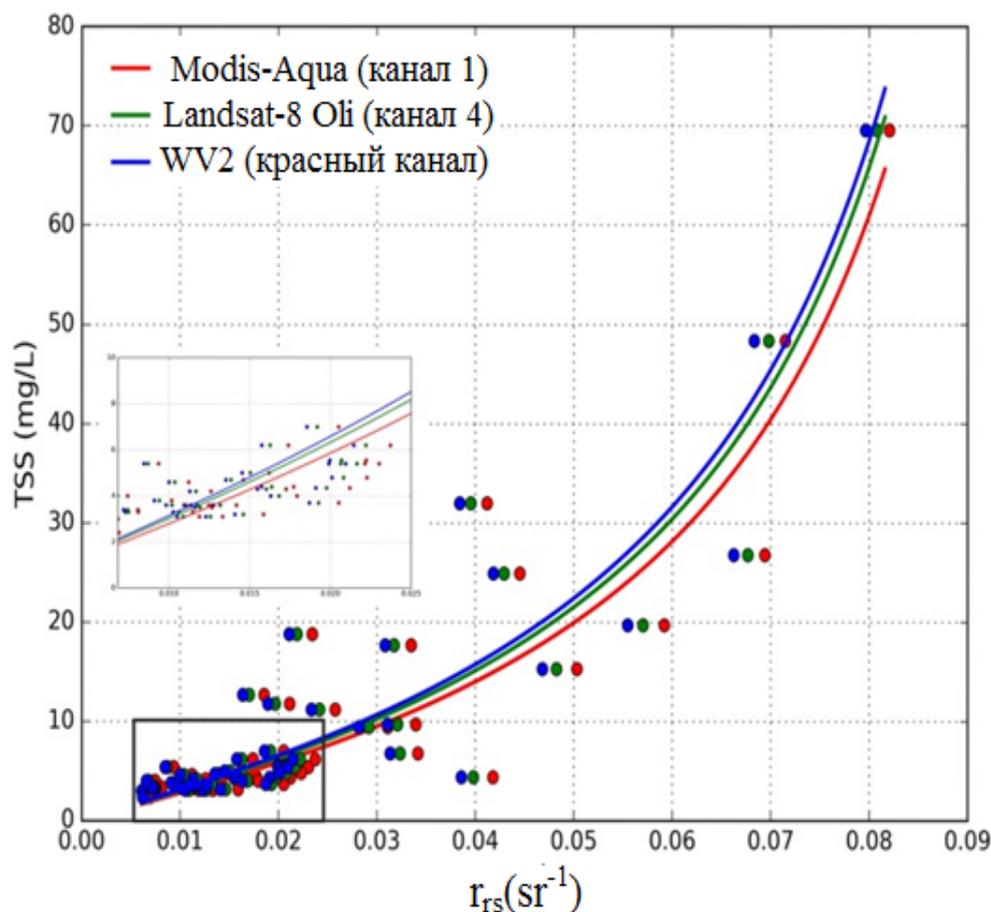
r_{rs} (красный канал) для WV-2;

$g_1 = 0,084; g_2 = 0,17.$

Для перехода от атмосферного скорректированного показателя отражения R_{rs} к показателю r_{rs} была использована формула

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{0,52 + 1,7R_{rs}(\lambda)}.$$

Модельные кривые регрессионной зависимости TSS от r_{rs} для выше указанных сенсоров приведены на рисунке, где левые точки и левая кривая соответствуют MODIS-Aqua, средние точки и кривая – LANDSAT-8 OLI, правые точки и кривая – WV-2 [11].



Модельные кривые регрессионной зависимости TSS от r_{rs} для MODIS-Aqua (правая кривая и правые точки); LANDSAT-8 OLI (средняя кривая и средние точки); WV-2 (левая кривая и левые точки)

Межкалибровка вышеуказанных сенсоров показала наличие следующих зависимостей между их выходными показателями [11]:

1) между LANDSAT-8 (R_{rs}) и MODIS-Aqua (R_{rs})

$$-y = 1,3893x - 0,0011; \quad \text{при } R^2 = 0,87; \quad (4)$$

2) между WV2 (R_{rs}) и MODIS-Aqua (R_{rs})

$$-y = 2,5431x - 0,001 = 61; \quad \text{при } R^2 = 0,61. \quad (5)$$

Как видно из выражений (4) и (5), межкалибровочные зависимости выходных показателей рассматриваемых сенсоров существенно различны, что дикту-

ет необходимость разработки общей методологии при проведении сравнения их информационных характеристик.

В общем случае, если выходную величину первого сравниваемого сенсора обозначить как R_{rs1} , то соответствующий сигнал второго сравниваемого сенсора можем определить как

$$R_{rs2} = f(R_{rs1}). \quad (6)$$

Если количество измерений, проводимых первым сенсором, определить как N_1 , а вторым – как N_2 , то количество информации, вырабатываемой первым сенсором, определим как

$$M_1 = N_1 \cdot \log_2 \left(\frac{R_{rs1 \max}}{\Delta R_{rs1}} \right); \quad \text{при } \frac{R_{rs1 \max}}{\Delta R_{rs}} \gg 1, \quad (7)$$

а вторым сенсором как

$$M_2 = N_2 \cdot \log_2 \left(\frac{R_{rs2 \max}}{\Delta R_{rs2}} \right); \quad \text{при } \frac{R_{rs2 \max}}{\Delta R_{rs}} \gg 1. \quad (8)$$

При условии

$$M_1 = M_2 \quad (9)$$

получаем соотношение между N_1 и N_2

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{\log_2 \left(\frac{R_{rs1 \max}}{\Delta R_{rs1}} \right)}{\log_2 \left(\frac{R_{rs1 \max}}{\Delta R_{rs2}} \right)}. \quad (10)$$

Рассмотрим задачу определения оптимальной межкалибровочной кривой между первым и вторым сенсорами. Если в общем случае принять обозначения

$$M_1 = \varphi_1(N_1; R_{rs1 \max}; \Delta R_{rs1}); \quad (11)$$

$$M_2 = \varphi_2(N_2; f(R_{rs1 \max}); \Delta R_{rs2}). \quad (12)$$

то в качестве интегрального критерия оптимальности можно выбрать следующее выражение:

$$E = \int_0^{R_{rs1 \max}} \left[\frac{\varphi_1(N_1; R_{rs1 \max}; \Delta R_{rs1}) - \varphi_2(N_2; f(R_{rs1 \max}); \Delta R_{rs2})}{\varphi_2(N_2; f(R_{rs1 \max}); \Delta R_{rs2})} \right] \cdot \Delta R_{rs1}. \quad (13)$$

Для вычисления оптимального вида межкалибровочной функции $F = f(R_{rs1})$ примем следующее предположение: функция $R_{rs2} = f(R_{rs1})$ должна быть выбрана из ограниченного класса функции, определяемого следующим интегральным ограничением:

$$\int_0^{R_{rs1\max}} f(R_{rs1}) dR_{rs1} = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (14)$$

В данном случае величина C определяется следующим образом:

$$f(R_{rs1}) = R_{rs1}. \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) имеем

$$C = R_{rs1\max}^2 / 2. \quad (16)$$

Следовательно, ограничительное условие (14) имеет энергетический смысл, т. е. межкалибровочные процедуры не должны сопровождаться энергозатратами.

С учетом выражений (7)–(14) можно составить следующий целевой функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$E_1 = \int_0^{R_{rs1}} \left[\frac{\log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1} - \log_2 \left(\frac{f(R_{rs1})}{\Delta R_{rs2}} \right)^{N_2}}{\log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1}} \right] dR_{rs} + \lambda \cdot \left[\int_0^{R_{rs1\max}} f(R_{rs1}) - C \right], \quad (17)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Оптимальной межкалибровочной функцией $f(R_{rs1})$ является такая функция, при которой E_1 достигает минимального значения, т. е. интегрированная величина разности показателей информативности достигает минимума.

Решение задачи

Согласно условиям уравнения Эйлера – Лагранжа [12], оптимальная функция R_{rs1} должна удовлетворить следующему условию:

$$d \left\{ \frac{\log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1} - \log_2 \left(\frac{f(R_{rs1})}{\Delta R_{rs2}} \right)^{N_2}}{\log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1}} + \lambda \cdot f(R_{rs1}) \right\} / df(R_{rs1}) = 0. \quad (18)$$

Из условия (18) получаем

$$\frac{-N_2 \left[\frac{f(R_{rs1})}{\Delta R_{rs2}} \right]^{N_2-1}}{(\ln 2) \cdot \left[\frac{f(R_{rs1})^{N_2}}{\Delta R_{rs2}} \right] \cdot \log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1}} + \lambda = 0. \quad (19)$$

Из выражения (19) имеем

$$\frac{N_2 \Delta R_{rs2}}{(\ln 2) \cdot f(R_{rs1}) \cdot \log_2 \left(\frac{f(R_{rs1})}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1}} = \lambda. \quad (20)$$

Из выражения (20) находим

$$f(R_{rs1}) = \frac{N_2 \Delta R_{rs2}}{(\ln 2) \cdot \lambda \cdot \log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1}}. \quad (21)$$

Конкретная величина λ может быть вычислена путем подставления выражения (21) в ограничительное условие (14). Не останавливаясь подробно на выполнении этой математической операции, обозначим результат как λ_0 .

Следовательно, оптимальная функция $f(R_{rs1})$, при которой критерии E и E_1 достигают экстремума, имеет вид:

$$f(R_{rs1}) = \frac{C_2}{\log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right)^{N_1}}, \quad (22)$$

где

$$C_2 = \frac{N_2 \Delta R_{rs2}}{\ln 2 \cdot \lambda_0} = \text{const}. \quad (23)$$

Легко проверить, что экстремум является минимумом. Для этого достаточно вычислить вторую производную интегранта в (17) по $f(R_{rs1})$ и убедиться, что результат всегда является положительной величиной.

Заключение и выводы

Таким образом, с учетом вышеуказанных допущений и ограничительных условий функция межкалибровки имеет вид (22), т. е. должно быть обеспечено условие

$$R_{rs2} \cdot \log_2 \left(\frac{R_{rs1}}{\Delta R_{rs1}} \right) = C_2. \quad (24)$$

При удовлетворении инвариантного условия (24) выбранный интегральный разностный информационный критерий оптимизации (17) достигает минимума, т. е. информативность рассматриваемых спектрорадиометров оказывается одинаковой.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

1. Сформулирована и решена задача сравнительного исследования информативности спектрорадиометров среднего разрешения при использовании их для оценки концентрации взвешенных твердых частиц в береговых водах морей и океанов.

2. Получено инвариантное условие, характеризующее функцию межкалибровки сравниваемых спектрорадиометров, при выполнении которого информативности измерителей минимально различны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Remotely-sensed chl. at the Chesapeake Bay mouth is correlated with annual freshwater flow to Chesapeake Bay / J. G. Acker, L. W. Harding, G. Leptoukh, T. Zhu, S. Shen // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – Vol. 32(5). – L05601. doi:10.1029/2004GL021852.
2. Binding C. E., Bowers D. G., Michelson-Jacob E. G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties [Electronic resource] // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 94 (3). – P. 373–383. [Mode of access]. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.002>.
3. An estimate of the distribution of suspended matter in Barents Sea waters on the basis of the Sea WIFS satellite ocean color scanner / V. I. Burenko, S. V. Ershova, O. V. Kopelevich, S. V. Shebestrov, V. P. Shevchenko // *Oceanology*. – 2001. – Vol. 41, No. 5. – P. 622–628.
4. Ekercin S. Water Quality Retrievals from High Resolution Ikonos Multispektral imagery: A Case Study in Istanbul, Turkey [Electronic resource] // *Water, Air and Soil Pollution*. – 2007. – Vol. 183(1–4). – P. 239–251. [Mode of access]. – <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-007-9373-5>.
5. A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event the Gulf of Finland [Electronic resource] / S. Koponen, J. Attila, J. Pulliainen, K. Kallio, T. Pyhalahti, A. Lindfors et al. // *Continental Shelf Research*. – 2007. – Vol. 27(2). – P. 228–244. [Mode of access]. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2006.10.006>.
6. Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data [Electronic resource] / K. Shi, Y. Zhang, X. Liu, M. Wang, B. Qin // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – Vol. 140. – P. 365–377. [Mode of access]. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.013>.

7. Miller R. L., McKee B. A. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters // *Remote Sensing of Environment*. – 2004. – Vol. 93 (1–2). – P. 259–266.

8. Doxaran D., Castaing P., Lavender S. J. Monitoring the maximum turbidity zone and detecting fine-scale turbidity features in the Gironde estuary using high spatial resolution satellite sensor (SPOT HRV, Landsat ETM+) data // *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 27 (11). – P. 2303–2321.

9. Worldview-2 high resolution remote sensing image processing for the monitoring of coastal areas / Engenio F., Marcello J., Bermejo J. A. (Eds.) // *21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013)* (9–13 September 2013). – 2013.

10. Potential of high Spatial and Temporal Ocean Color Satellite Data to study the Dynamics of Suspended Particles in a Micro-Tidal River Plume / A. Ody, D. Doxaran, Q. Vanhenellemont, B. Nechad, S. Novoa, G. Many et. al. // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8 (3). – P. 245.

11. Dorji P., Fearn P. Impact of the spatial resolution of satellite remote sensing sensors in the quantification of total suspended sediment concentration: A case study in turbid waters of Northern Western Australia [Electronic resource] // *PLoS ONE*. – 2017. – Vol. 12 (4). – e0175042. – [Mode of access]. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175042>.

12. Эльсгольц Л. Е. Дифференциальное уравнение и вариационное исчисление. – М. : Наука, 1974. – 432 с.

Получено 09.01.2019

© Сима Аждар кызы Аскерова, Рена Омар кызы Гусейнова, 2019

RESEARCH OF REMOTE SENSING INFORMATIVITY OF SUSPENDED PARTICLES IN SEA WATERS BY MEANS OF USING SPECTRAL RADIOMETERS WITH MEDIUM DENSITY RESOLUTION

Sima Ajdar gizi Askerova

National Aerospace Agency, 1, S. S. Akhundov St., building 2, Baku, Az 1115, Azerbaijan Republic, Leading Researcher, phone: 9940125623146, e-mail: askerovasima88@mail.ru

Rena Omar gizi Huseynova

Azerbaijan Architectural-Construction University, 11, A. Sultanova St., Baku, Az 1073, Azerbaijan Republic, Ph. D., Associate Professor, Department of Information Technologies and Systems, phone: 9940125309899, e-mail: renahuseynova55@gmail.com

The article is devoted to informativity analysis of remote sensing of suspended particles in sea waters by spectral radiometers with medium density spatial resolution. It denotes that calibration values of medium density resolution spectral radiometers are significantly different, which implies the necessity of further development of general methodology for the comparison of their informational characteristics. The article formulates and solves the task of comparative research of the informativity of medium density resolution spectral radiometers in using them for an estimation of suspended particles concentration in the shore waters of seas and oceans. In accordance with the suggested solution the optimal calibration function is the function where an integrated value of informativity parameters' difference reaches up the minimum. There obtained the invariant condition, characterizing the calibration function of the compared spectral radiometers when the informativity of measurers is the least different.

Key words: informativity, suspended particles, optimization, calibration, sea waters, spectral radiometer.

REFERENCES

1. Acker, J. G., Harding, L. W., Leptoukh, G., Zhu, T., & Shen, S. (2005). Remotely-sensed chl. at the Chesapeake Bay mouth is correlated with annual freshwater flow to Chesapeake Bay. *Geophysical Research Letters*, 32(5), L05601. doi:10.1029/2004GL021852.
2. Binding, C. E., Bowers, D. G., & Michelson-Jacob, E. G. (2005). Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties. *Remote Sensing of Environment*, 94(3), 373–383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.002>.
3. Burenko, V. I., Ershova, S. V., Kopelevich, O. V., Shebestrov, S. V., & Shevchenko, V. P. (2001). An estimate of the distribution of suspended matter in Barents Sea waters on the basis of the Sea WIFS satellite ocean color scanner. *Oceanology*, 41(5), 622–628.
4. Ekercin, S. (2007). Water Quality Retrievals from High Resolution Ikonos Multispectral imagery: A Case Study in Istanbul, Turkey. *Water, Air and Soil Pollution*, 183(1–4), 239–251. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-007-9373-5>.
5. Koponen, S., Attila, J., Pulliainen, J., Kallio, K., Pyhalahti, T., Lindfors A. et al. (2007). A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event the Gulf of Finland. *Continental Shelf Research*, 27(2), 228–244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2006.10.006>.
6. Shi, K., Zhang, Y., Liu, X., Wang, M., & Qin, B. (2014). Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data. *Remote Sensing of Environment*, 140, 365–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.013>.
7. Miller, R. L., & McKee, B. A. (2004). Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 93(1–2), 259–266.
8. Doxaran, D., Castaing, P., & Lavender, S. J. (2006). Monitoring the maximum turbidity zone and detecting fine-scale turbidity features in the Gironde estuary using high spatial resolution satellite sensor (SPOT HRV, Landsat ETM+) data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(11), 2303–2321.
9. Engenio F., Marcello J., Bermejo J. A. (Eds.). (2013). Worldview-2 high resolution remote sensing image processing for the monitoring of coastal areas. *21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013) (9–13 September 2013)*.
10. Ody, A., Doxaran, D., Vanhenellemont, Q., Nechad, B., Novoa, S., Many, G. et al. (2016). Potential of high Spatial and Temporal Ocean Color Satellite Data to study the Dynamics of Suspended Particles in a Micro-Tidal River Plume. *Remote Sensing*, 8, P. 245.
11. Dorji, P., & Fearn, P. (2017). Impact of the spatial resolution of satellite remote sensing sensors in the quantification of total suspended sediment concentration: A case study in turbid waters of Northern Western Australia. *PLoS ONE*, 12(4), e0175042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175042>.
12. Elsgolts, L. E. (1974). *Differencial'noe uravnenie i variacionnoe ischislenie [Differential equation and calculus of variations]*. Moscow: Nauka, 432 p.

Received 09.01.2019

© Sima Ajdar gizi Askerova, Rena Omar gizi Huseynova, 2019