

Н.Н. Никифорова, С.В. Калиничева, А.Н. Федоров

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

e-mail: nurguyana_93@mail.ru

e-mail: ikoveta@rambler.ru

e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕСОВОЙ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ АНАБАРСКОЙ ТУНДРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. В настоящее время идет потепление климата, среднегодовые температуры с каждым годом растут, Арктика остается одним из самых уязвимых регионов. Это заметно влияет на северные леса, что приводит к вытеснению зоны тундры. Оценка последствий прогнозируемого повышения температуры воздуха в условиях изменения климата требует пространственного и мгновенного мониторинга труднодоступных территорий. В последние несколько лет использование методов дистанционного зондирования и комбинаций спутниковых снимков для вычисления вегетационных индексов вызвали огромный интерес к получению наземных данных высокой четкости. В статье представлены результаты моделирования влажности почвогрунтов на территории Анабарской тундры, который расположен на северо-западе Якутии. Исследование проводилось на границе тундры и лесотундры в трех эталонных участках (тундра, притундровый молодой лес, притундровый коренной лес). Моделирование представлено посредством сопоставления натуральных данных и нормализованного разностного индекса влажности NDMI. Индекс NDMI использует каналы NIR и SWIR, вычисляет многоканальный растровый объект и создает растровое изображение со значениями индекса от -1 до 1, которые показывают уровень влажности с пространственным разрешением 10 метров. Данные показали, что значение пикселей влажности по NDMI в зоне тундры-0.04, притундрового молодого леса- 0.09 и в притундровом коренном лесу 0.15. Установлено, что данные индекса коррелируются с полевыми данными влажности, полученными с глубины 0,2 м. Сопоставление данных дешифрирования дистанционного зондирования с натурными данными позволило смоделировать пространственное распределение влажности грунтов на обширную исследуемую территорию методом экстраполяции.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, мерзлотные ландшафты, влажность грунта, тундра, лесотундра, картографирование, дистанционное зондирование Земли, вегетационный индекс, NDMI.

N.N. Nikiforova, S.V. Kalinicheva, A.N. Fedorov

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

e-mail: nurguyana_93@mail.ru

e-mail: ikoveta@rambler.ru

e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

MODELING THE WEIGHT MOISTURE CONTENT OF SOILS IN ANABAR TUNDRA USING GROUND-BASED RESEARCH AND REMOTE SENSING DATA OF THE EARTH

Abstract. Presently, the climate is warming, with average annual temperatures rising every year, and the Arctic remaining one of the most vulnerable regions. This has a noticeable effect on the northern forests, which leads to the displacement of the tundra zone. Assessing the consequences of a projected increase in air temperature under climate change conditions requires spatial and instant monitoring of hard-to-reach areas. In the last few years, the use of remote sensing techniques and combinations of satellite imagery to calculate vegetation indices has

generated great interest in obtaining high-definition ground data. The article presents the results of modeling soil moisture in Anabar tundra, which is located in the north-west of Yakutia. The study was conducted on the border of tundra and forest tundra in three reference areas (tundra, tundra young forest, tundra indigenous forest). The simulation is presented by comparing the field data and the normalized difference index of humidity NDMI. The NDMI index uses the NIR and SWIR channels, calculates a multi-channel raster object and creates a raster image with index values from -1 to 1, which show the humidity level with a spatial resolution of 10 meters. The data showed that the value of humidity pixels according to NDMI in the tundra zone is 0.04, in the tundra young forest is 0.09 and, in the tundra, native forest is 0.15. It was found that the index data correlated with field humidity data obtained from a depth of 0.2 m. A comparison of remote sensing decryption data with field data made it possible to simulate the spatial distribution of soil moisture over the vast study area by extrapolation.

Keywords: permafrost, permafrost landscapes, soil moisture, tundra, forest tundra, mapping, remote sensing of the Earth, vegetation index, NDMI.

Введение

Глобальное потепление климата, наблюдаемое на Земле в последние десятилетия, наиболее ярко выражено в районах Арктики и Субарктики. Большая часть ландшафтов в данных областях, отличающиеся повышенной льдистостью, являются наиболее чувствительными к потеплению климата и к техногенному воздействию [1-3]. В виду этого возникает необходимость проведения мониторинговых исследований за геокриологическими условиями грунтов в рассматриваемой зоне.

Основным показателем при расчете льдистости грунтов является влажность. При анализе влажности грунтов, в период полевых работ пробы отбираются лишь на ключевых участках, в то время как площади исследований могут занимать десятки и сотни квадратных километров. В условиях нехватки (ограниченности) пространственных данных о параметрах природной среды одним из способов решения могут служить спутниковые снимки, возможность и актуальность использования которых обуславливается их доступностью, большим пространственным охватом, повторяемостью съемок и современными методами их обработки. Потенциал использования материалов дистанционного зондирования при исследовании влажности грунтов на обширных территориях может быть представлен путем применения нормализованного разностного индекса влажности – NDMI.

NDMI – это нормализованный разностный индекс влажности (Normalized Difference Moisture Index), который относится к группе индексов Sanopy Water Content, которые предназначены для оценки содержания влаги в растительном покрове. Ряд исследований показывает, что в настоящий момент нет однозначного ответа с каким компонентом ландшафта имеет взаимосвязь данный индекс. Так, например, Hunt и Rock [4] обнаружили, что соотношение ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного каналов линейно коррелирует с относительным содержанием воды в листьях, а исследования Hardinsky и др. [5] показали, что NDMI в значительной степени коррелирует с содержанием воды в пологе леса.

В настоящем исследовании авторами сделана попытка моделирования влажности почвогрунтов на территории Анабарской тундры на основе корреляции полевых измерений влажности и данных ДЗЗ (NDMI) и последующей экстраполяции полученных результатов на рассматриваемую территорию.

Основная цель работы состоит в совершенствовании геокриологического дешифрирования путем оценки возможности применения индекса NDMI наряду с полевыми данными для исследования и мониторинга влажности грунтов в тундровой зоне.

Исследование нами проводилось на границе тундры и лесотундры в Анабарском районе Республики Саха (Якутия) на 3 участках: 1 – тундра, 2 – притундровый молодой лес, 3 – притундровый коренной лес (рис. 1).

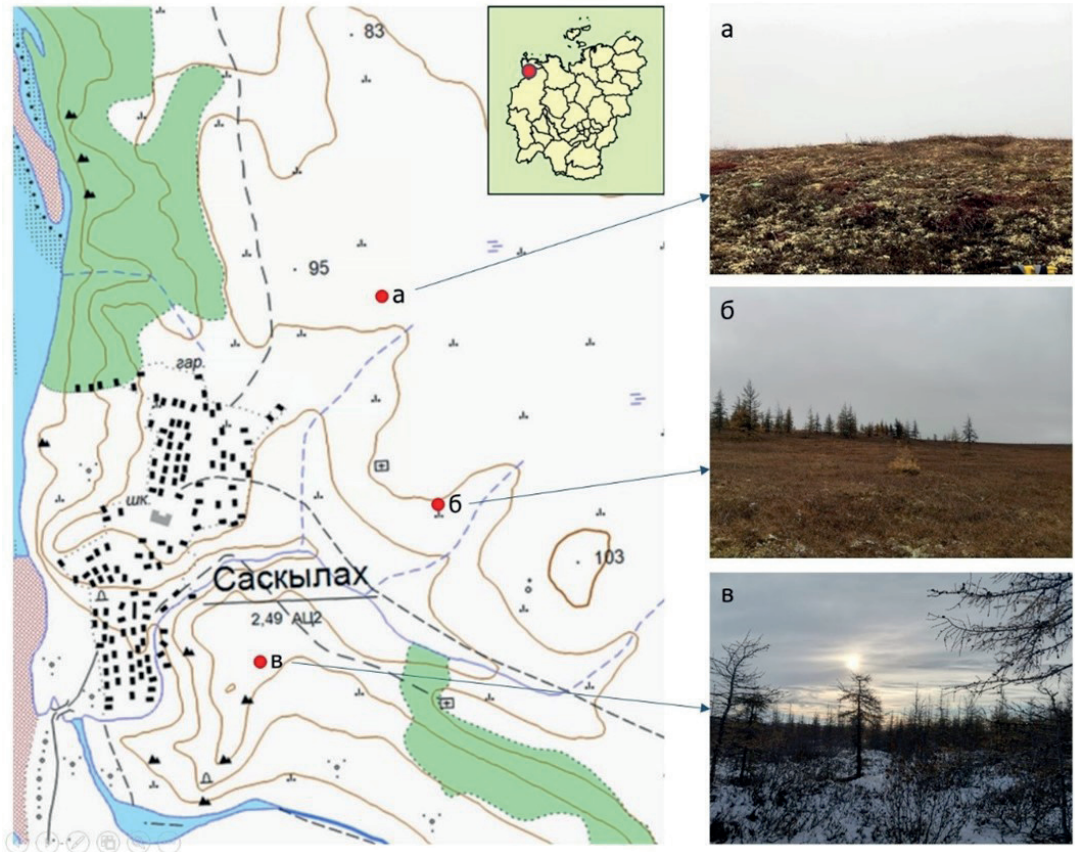


Рис. 1. Территория исследования
а – тундра, *б* – притундровый молодой лес, *в* – притундровый коренной лес

Fig. 1 Study area
a – tundra, *б* – pre-tundra young forest, *в* – pre-tundra forest

Природные условия района

Территория исследования находится на территории Анабарского района РС (Я) вблизи с. Саскылах в зоне тундры.

В физико-географическом отношении участок исследования относится к Анабаро-Оленекской озерно-термокарстовой провинции [6].

Климат территории исследования характеризуется резко выраженной континентальностью и суровостью. Среднегодовая температура воздуха по гидрометеостанции Саскылах $-14,0^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков 228 мм за год, из них около 140-150 мм в теплое время года (табл. 1). Исследуемая территория в течение 256 дней (8 месяцев) находится под снежным покровом [7].

Ландшафтная структура исследуемой территории представлена тундровыми и лесотундровыми типами ландшафтов. Тундровые ландшафты представляют собой безлесные переувлажненные территории с широким развитием мохово-лишайникового покрова, присутствием низкорослых кустарников и кустарничков, имеющие преобладающее распространение в тундровой зоне в пределах субарктического пояса. Лесотундровые ландшафты являются переходным типом между южной тундрой и северной тайгой и представлены тундровыми комплексами в сочетании с лиственничными рединами и редколесьями [9].

Таблица 1 – Среднегодовое количество осадков и средняя годовая температура воздуха исследуемой территории [8]

Год	Средняя годовая температура воздуха, °С	Осадки, мм		
		Среднегодовая сумма осадков	Снежный покров (октябрь- апрель)	Летние атмосферные осадки (май- сентябрь)
2010	-12,1	221	139	81
2011	-10,7	175	101	74
2012	-12,1	177	96	81
2013	-13,2	161	34	127
2014	-12,8	171	65	106
2015	-13,1	147	84	63
2016	-11,9	99	44	55
2017	-12,7	78	41	37
2018	-11,8	292	111	181
2019	-11,3	205	84	121
2020	-8,1	289	134	155
2021	-12,7	147	50	97
Среднее значение	-11,8	180,1	81,9	98,1

Многолетнемерзлые грунты распространены на всей территории района. В ее северной части глубина мерзлых грунтов достигает 400-700 м, а в южной, около с. Саскылах- -1000-1500 м. Для территории исследования характерны такие мерзлотные процессы, как солифлюкция, морозная сортировка, термокарст, пучение и термоэрозия. Мерзлотные процессы, в частности, морозобойное растрескивание грунтов определяют важнейшие черты ландшафтов – формирование полигонально-валикового рельефа [10].

Материалы и методы

Для определения весовой влажности почвогрунтов в период полевых работ отбирались образцы из отдельных горизонтов почвы через каждые 10 см на глубине от 0,1 до 0,8-1 м (верхней поверхности ММП) с помощью ручного почвенного буро-проботборника.

В камеральном этапе данные образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 105°С. Далее, весовая влажность определялась посредством формулы:

$$W = \frac{100 * (m_1 - m_0)}{m_0 - m} , \tag{1}$$

где m_1 – вес пустого бюкса и влажного грунта, г; m_0 – вес пустого бюкса и сухого грунта, г; m – вес пустого бюкса, г.

Индекс NDMI (нормализованный разностный индекс влажности) рассчитывается по формуле [11]:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{(NIR + SWIR)} , \tag{2}$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области, SWIR – отражение в средней инфракрасной области спектра, предназначенного для приглушения освещения и атмосферных эффектов. Интерпретация NDMI варьируется значениями от -1 до 1, где каждое значение показывает уровень увлажненности в зоне исследования.

Работа со спутниковыми снимками и расчет индекса NDMI для анализа влажности грунтов проводилась в программном обеспечении QGIS. Данные для работы были получены

со спутника Sentinel-2 в виду его доступности и высокого пространственного разрешения (10-20 м).

Для корреляции материалов натуральных исследований и данных космической съемки был выбран одинаковый сезон – сентябрь [12].

Результаты и обсуждение

Исследование нами проводилось в 3 этапа. На первом этапе, как указывалось выше, проводился отбор проб влажности почвогрунтов на ключевых участках во время полевого периода и высушивание их до постоянной массы для расчета весовой влажности (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2 – Весовая влажность почвогрунтов на территории Анабарской тундры, сентябрь 2021 г.

	Тундра	Притундровый молодой лес	Притундровый коренной лес
Глубина, м	Весовая влажность грунта, %		
0,1	15,9	21,8	21,3
0,2	15,2	19,7	22,5
0,3	13,9	19,9	16,7
0,4	6,9	23,6	17,8
0,5	19,0	24,0	18,3
0,6	18,1	23,5	19,4
0,7	23,6	19,0	19,3
0,8	35,7	58,2	60,7
0,9	-	72,2	-
1	-	65,9	-

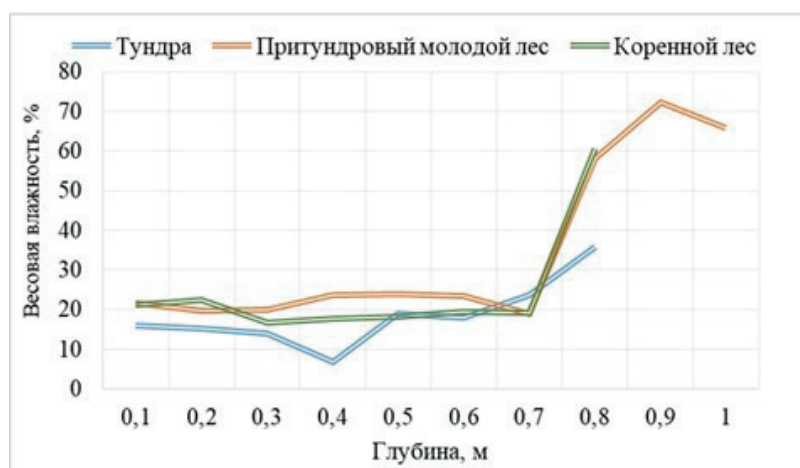


Рис. 2. Весовая влажность почвогрунтов на исследуемых участках: тундры, притундрового молодого ли коренного леса

Fig. 2 Weight moisture of soils in the studied areas: tundra, pre-tundra young deciduous forest

На втором этапе, нами проводились расчеты нормализованного разностного индекса влажности (NDMI) по приведенной выше формуле и составление карты (рис. 3).

Как видно из графика (рис. 2) весовая влажность почвогрунтов в тундре ниже, чем на участке с лесным массивом. Значения влажности грунтов в районе молодого и коренного леса примерно одинаковы за исключением некоторых расхождений по глубине. Так, если на глубине 0,2 м в коренном лесу влажность грунтов выше, чем в молодом лесу, то в промежутке от 0,3 до 0,6 м влажность несколько ниже второго и только с 0,7 м значение влажности опять повышается. Данная закономерность наблюдается и на карте влажности, составленной посредством индекса NDMI.

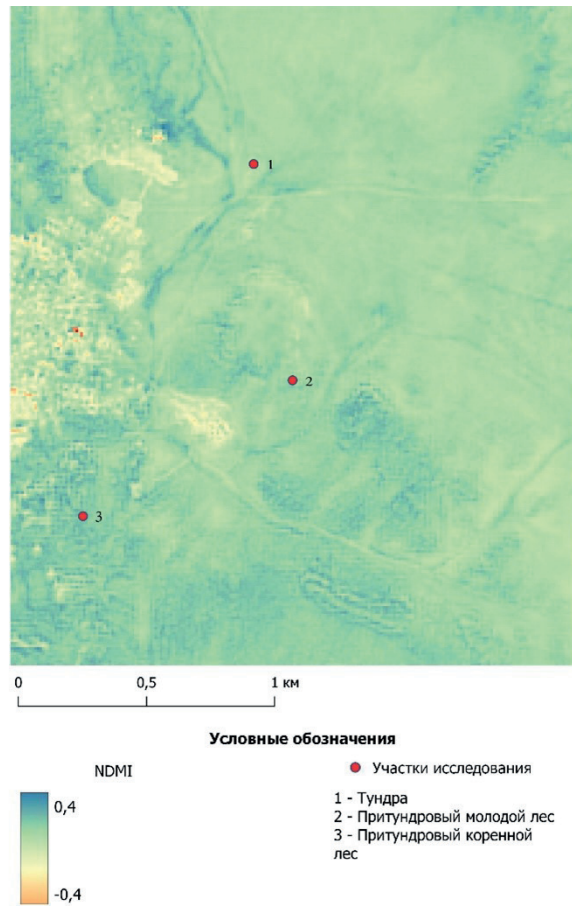


Рис. 3. Карта влажности, полученная с помощью расчета индекса NDMI

Fig. 3 Moisture map obtained by calculating the NDMI index

На третьем этапе сопоставлялись полевые данные влажности грунтов и NDMI, в результате которого было выявлено, что значения индекса NDMI (в пикселях) коррелируется с полевыми данными влажности грунтов на глубине 0,2 м (табл.3).

Таблица 3 – Соотношение натуральных данных весовой влажности грунтов со значениями индекса NDMI

Природная зона	Весовая влажность грунта в % (глубина 0,2 м)	Значение влажности по индексу NDMI
Тундра	15,2	0,04
Притундровый молодой лес	19,7	0,09
Притундровый коренной лес	22,5	0,15

Далее, посредством сопоставления полевых данных влажности грунтов и индекса влажности NDMI рассчитывался градиент (шаг) для экстраполяции влажности грунтов на всю рассматриваемую территорию. Для этого нами была использована простая статистическая формула:

$$GradW = \frac{W_{fmax} - W_{fmin}}{W_{NDMImax} - W_{NDMImin}}, \quad (3)$$

где W_{fmax}/W_{fmin} – влажность грунтов максимальная/ минимальная по полевым измерениям,

$W_{NDMI_{max}}/W_{NDMI_{min}}$ – влажность грунтов максимальная/ минимальная рассчитанная по индексу NDMI.

Были рассчитаны градиенты влажности отдельно для участка тундры и отдельно для лесистой части исследуемой территории. С учетом количества существующих полевых данных выделили 5 диапазонов влажности. Рассчитанные и скорректированные результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты моделирования влажности почвогрунтов

Влажность грунтов по полевым данным	Влажность грунтов по индексу NDMI (значения пикселей)
12,5 – 15,0 %	0,01- 0,03
15,1 – 17,0 %	0,04- 0,06
17,1 – 20,5 %	0,07- 0,1
20,6- 22,5 %	0,11- 0,15
22, 6- 25,0 %	0,16- 0,2

С применением полученных значений была составлена карта влажности почвогрунтов на всю рассматриваемую территорию (рис. 4).

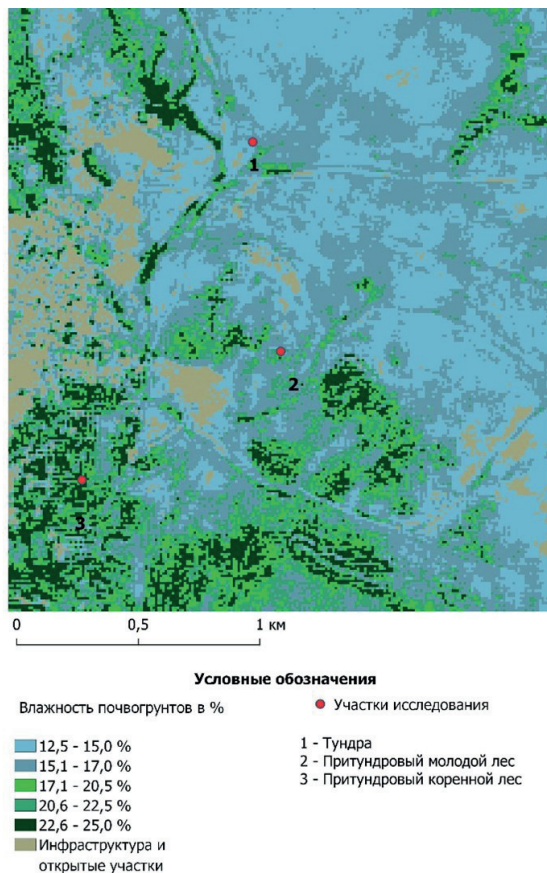


Рис. 4. Карта влажности почвогрунтов Анабарской тундры, полученная путем моделирования

Fig.4 A moisture map of the soils of Anabar tundra obtained by modeling

Согласно карте (рис.4), наименьшая влажность со значением 12,5-15,0 % наблюдается на участке тундры, некоторое ее увеличение (15,1-17,0) фиксируется на дренированных участках, ложбинках, в долине мелких ручьев и при переходе от тундры к притундровому лесу. На участке молодого леса значение влажности варьирует в пределах от 17,1 до 22,5 %. В районе коренного леса влажность имеет максимальное значение (22,6-25,0 %) немного понижаясь на разреженных и краевых участках.

Заключение

В работе приведены результаты исследований влажности почвогрунтов на территории Анабарской тундры с применением полевых данных и материалов ДЗЗ – индекса влажности (NDMI). Результаты исследования показали, что данный индекс коррелируется с полевыми данными влажности на глубине 0,2 м. Сопоставление данных с натурными данными позволило смоделировать пространственное распределение влажности грунтов на обширную исследуемую территорию методом экстраполяции.

По полученным результатам составлена карта влажности территории Анабарской тундры.

По результатам исследования можно сделать вывод, что представленный способ моделирования влажности почвогрунтов посредством корреляции натуральных данных и индекса влажности (NDMI) достаточно репрезентативен и может применяться при исследовании обширных труднодоступных территорий.

В дальнейшем авторами планируется моделирование глубины сезонно-талого слоя на всю рассматриваемую территорию Анабарской тундры с применением полученных данных по влажности и результатов полевых измерений по глубине сезонно-талого слоя.

Работа выполнена в рамках базового проекта СО РАН АААА-А20-120111690009-6.

Литература

1. Григорьев, М.Н. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции / М.Н. Григорьев, С.О. Разумов, В.В. Куницкий, В.Б. Спектор. – Текст : непосредственный // Криосфера Земли. – 2006. – Т. X. № 4. – С. 74-94.
2. Fedorov, A.N. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia / Ivanova R.N., Park H., Hiyama T., Iijima Y., 2014, POLAR SCIENCE, Vol. 8, Issue 2, 114-128. DOI://DX.DOI.ORG/10.1016/J.POLAR.2014.02.001
3. Schuur, E. A. G. Climate change and the permafrost carbon feedback / E. A. G. Schuur, A. D. McGuire, C. Schädel, G. Grosse, J. W. Harden, D.J. Hayes, J. E. Vonk, Nature, 2015. – 520 (7546) – С. 171–179. doi:10.1038/nature14338.
4. Hunt, E.R and Rock B.N. Detection of Changes in Leaf water Content Using near and Middle-Infrared Reflectances. Remote Sensing of Environment 1989, 30, 43-54.
5. Hardisky M.A.; Klemas V.; Smart R.M. The Influence of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Radiance of Spartina Alterniflora Canopies. Photogramm. Eng. Remote Sens. 1983, 49, 77–83.
6. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. Масштаб 1: 2 500 000. / Гл. ред. П. И. Мельников. – М.: ГУГК, 1991. – 2 л.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып.24: Якутская АССР, кн.1, сер.3. Многолетние данные, ч. 1-6. Л., Гидрометеоздат, 1989. – 607 с.
8. Погода и климат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 6.02.2023).
9. Данилов, Ю.Г. Ландшафты Якутии / Ю.Г. Данилов, А.Н. Федоров и др. – Якутск: Издат. дом СВФУ, 2016 – 100 с. – Текст : непосредственный.
10. Анабарский улус: История. Культура. Фольклор/ Администрация муниципального образования «Анабарский национальный (долгано-эвенкийский) улус»; Ин-т гуманитар. исслед. АН РС (Я); Гл.ред. кол. серии В.Н. Иванов (гл. ред.) и др.; Ред. кол.: Боякова С.И. и др. – Якутск: Бичик, 2005. – 232 с.

11. Gao, B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* / B. C. Gao. – 1996, 58, 257 – 266 с.

12. Кравцова, В.И. Космические методы исследования почв: Учебное пособие для студентов вузов / В. И. Кравцова. – М.: Аспект Пресс, 2005. – 190 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Grigor'ev, M.N. Dinamika beregov vostochnyh arkticheskikh morej Rossii: osnovnye faktory, zakonomernosti i tendencii / M.N. Grigor'ev, S.O. Razumov, V.V. Kunickij, V.B. Spektor. – Текст : непосредственный // Кriosфера Земли. – 2006. – Т. X. № 4. – С. 74-94.

2. Fedorov, A.N. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia / Ivanova R.N., Park H., Hiyama T., Iijima Y., 2014, POLAR SCIENCE, Vol. 8, Issue 2, 114-128. DOI://DX.DOI.ORG/10.1016/J.POLAR.2014.02.001

3. Schuur, E. A. G. Climate change and the permafrost carbon feedback / E. A. G. Schuur, A. D. McGuire, C. Schädel, G. Grosse, J. W. Harden, D.J. Hayes, J. E. Vonk, *Nature*, 2015. – 520 (7546) – S. 171–179. doi:10.1038/nature14338.

4. Hunt, E.R and Rock B.N. Detection of Changes in Leaf water Content Using near and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment* 1989, 30, 43-54.

5. Hardisky M.A.; Klemas V.; Smart R.M. The Influence of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Radiance of *Spartina Alterniflora* Canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1983, 49, 77–83.

6. Merzlotno-landshaftnaja karta Jakutskoj ASSR. Masshtab 1: 2 500 000. / Gl. red. P. I. Mel'nikov. – М.: GUGK, 1991. – 2 l.

7. Nauchno-prikladnoj spravocnik po klimatu SSSR. Vyp.24: Jakutskaja ASSR, kn.1, ser.3. Mnogoletnie dannye, ch. 1-6. L., Gidrometeoizdat, 1989. – 607 s.

8. Pogoda i klimat [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.pogodaiklimat.ru> (data obrashhenija: 6.02.2023).

9. Danilov, Ju.G. Landshafty Jakutii / Ju.G. Danilov, A.N. Fedorov i dr. – Jakutsk: Izdat. dom SVFU, 2016 – 100 s. – Текст : непосредственный.

10. Anabarskij ulus: Istorija. Kul'tura. Fol'klor/ Administracija municipal'nogo obrazovanija «Anabarskij nacional'nyj (dolgano- jevenkijskij) ulus»; In-t gumanit. issled. AN RS(Ja); Gl.red. kol. serii V.N. Ivanov (gl. red.) i dr.; Red. kol.: Bojakova S.I. i dr. – Jakutsk: Bichik, 2005. – 232 s.

11. Gao, B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* / B. C. Gao. – 1996, 58, 257 – 266 с.

12. Kravcova, V.I. Kosmicheskie metody issledovanija pochv: Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov / V. I. Kravcova. – М.: Aspekt Press, 2005. – 190 s. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах

НИКИФОРОВА Ньургьяна Николаевна – м.н.с., Институт Мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, e-mail: nurguyana_93@mail.ru

NIKIFOROVA Nurguiana Nikolaevna – Junior researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia, e-mail: nurguyana_93@mail.ru

КАЛИНИЧЕВА Светлана Вячеславовна – к.г.н, н.с., Институт Мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, e-mail: ikoveta@rambler.ru

KALINICHEVA Svetlana Vyacheslavovna – Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, e-mail: ikoveta@rambler.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич – д.г.н, г.н.с., Институт Мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

FEDOROV Aleksandr Nikolaevich – Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru