

ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104>

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «ПИНЕЖСКИЙ»

Научная статья

Колесникова Т.И.¹, Овсепян А.Э.^{2,*}, Зимовец А.А.³, Тельнова Ю.А.⁴, Лукичев Д.А.⁵, Ковалев Я.А.⁶

² ORCID : 0000-0002-6914-2539;

³ ORCID : 0000-0002-6552-4978;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ovsepleat[at]yandex.ru)

Аннотация

Для особо охраняемых природных территорий мониторинг состояния ландшафтов представляет приоритетную задачу. Зачастую исследования территории заповедника ограничивается определенными сложностями – ввиду отсутствия инфраструктуры, дорог, необходимости долгих пеших прогулок, которые совмещаются с экспедиционными исследованиями, наблюдениями, выполнением дополнительных работ. В настоящее время появились возможности комплексного исследования состояния ландшафтов на больших территориях благодаря доступности спутниковой информации, постоянному совершенствованию оборудования спутников – увеличению охвата территории, учитываемых спектров и т.д. В настоящей работе применен метод оценки состояния ландшафтов путем расчета нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI) на примере Пинежского государственного заповедника. Рассчитаны индексы для периода максимальной вегетации растений для 3-х лет, проведен сравнительный анализ состояния растительности ландшафтов, также по данным дистанционного зондирования Земли рассчитан индекс температуры земной поверхности.

Ключевые слова: мониторинг, состояние растительного покрова, заповедник, нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), Архангельская область.

APPLICATION OF NDVI INDEX TO EVALUATE THE STATE OF VEGETATION OF SPECIALLY PROTECTED NATURAL TERRITORIES ON THE EXAMPLE OF THE "PINEZHSKY" STATE NATURE RESERVE

Research article

Kolesnikova T.I.¹, Ovsepyan A.E.^{2,*}, Zimovets A.A.³, Telnova Y.A.⁴, Lukichev D.A.⁵, Kovalev Y.A.⁶

² ORCID : 0000-0002-6914-2539;

³ ORCID : 0000-0002-6552-4978;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (ovsepleat[at]yandex.ru)

Abstract

Monitoring of landscape condition is a priority task for specially protected natural territories. Often studies of the reserve's territory are limited by certain difficulties – due to the lack of infrastructure, roads, the need for long walks, which are combined with expeditionary studies, observations, and additional work. Nowadays, there are opportunities for complex research of landscape condition on large territories due to availability of satellite information, constant improvement of satellite equipment – increase of territory coverage, accounted spectra, etc. In the present work, the method of assessing the state of landscapes by calculating the normalized difference vegetation index (NDVI) has been applied on the example of the "Pinezhsky" State Reserve. Indices for the period of maximum vegetation of plants for 3 years were calculated, comparative analysis of the state of vegetation of landscapes was carried out, also the index of the earth surface temperature was calculated using the data of remote sensing of the Earth.

Keywords: monitoring, state of vegetation cover, reserve, normalized difference vegetation index (NDVI), Arkhangelsk Oblast.

Введение

Оценка современного состояния ландшафтов и мониторинговые наблюдения за их трансформацией под влиянием различных факторов является актуальной задачей современной экологии и управления природными ресурсами. При проведении мониторинга ландшафтов в современной науке активно используются космические снимки для расчета значений вегетационного индекса (NDVI) и температуры поверхности (LST), что позволяет проанализировать динамику изменения различных показателей на больших территориях за длительный период времени. Особый интерес представляют подобные исследования на территориях особого правового режима, где сохранение биоразнообразия и экосистемных функций является приоритетной задачей.

Объектом данного исследования является территория Пинежского заповедника, площадью 515 км², расположенного в зоне умеренно-континентального климата в северо-таежной подзоне таежной зоны Европейской части России в пределах Архангельской области. Ландшафты Пинежского заповедника исследовались Сабуровым Д.Н. [1], [2], Андрейчуком В.Н. [3], Рыковым А.М., Рыковой С.Ю. [4], Поповым С.Ю. [5], [6], [7], сотрудниками заповедника и др. В 1999 г. составлена подробная ландшафтная карта [8], на которой отражены различные

особенности ландшафта, включая ледниковые образования с карстовыми элементами, карстово-ледниковые, карстогенные и пластово-денудационные ландшафты. Исследователями Шавриной Е.В., Малковым В.Н. [9] проведена и обобщена работа по изучению особенностей геологического строения, рельефа и водоносности территории Пинежского заповедника.

Заповедник является значимым объектом природной сохранности и имеет высокую биологическую ценность в связи с наличием уникальных ледниковых ландшафтов с элементами карста, характеризующихся высокой лесистостью (80%) и заболоченностью. Территория Пинежского заповедника располагается в Беломорско-Кулойском округе полосы северо-таежных лесов Северодвинско-Верхнеднепровской подпровинции Североевропейской таежной провинции [10]. Преобладающей растительной формацией заповедника являются коренные еловые леса (51,3 % от общей площади заповедника) [6]. В меньшей степени представлены коренные сосновые леса – 9,5% от общей площади заповедника леса [7]. На участках гарей и вырубок, а также на территориях с развитым карстом, господствуют березовые (24,6% от общей площади заповедника) и осиновые (0,9%) формации [5]. Распределение различных типов растительности по территории заповедника имеет неоднородный характер и зависит от множества факторов – местоположения, характера подстилающих грунтов, микроклимата, степени заболоченности и дренированности территории, пожароопасности, а также уровня антропогенного влияния.

Целью работы является анализ изменений нормализованного относительного вегетативного индекса растительности (NDVI) и температуры земной поверхности (LST) на территории Пинежского заповедника с помощью космических снимков Landsat 8 Level 1, разрешение которых составляет 30 м² на пиксель и содержит набор мультиспектральных каналов, необходимых для мониторинговых наблюдений. В ходе исследования использованы выборочные космические снимки за летний период 2016, 2020, 2022 гг.

В задачи исследования входит: охарактеризовать ландшафты Пинежского заповедника, провести обработку данных космоснимков и рассчитать индексы для территории заповедника, провести сравнительный анализ изменения индекса NDVI для разных лет, определить перспективы применения для Пинежского заповедника, выявить сложности и наметить пути решения.

Методы и принципы исследования

Государственный природный заповедник «Пинежский» расположен в 180 км к северо-востоку от г. Архангельска на правом берегу р. Пинеги (рис. 1). Площадь заповедника составляет 51 890 га, охранной зоны – 31 587 га. Заповедник был образован в 1974 г. с целью сохранения таежных ландшафтов юго-востока Беломорско-Кулойского плато. Площадь заповедника характеризуются высокой закарстованностью территории [11].



Рисунок 1 - Географическое расположение Пинежского заповедника
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.1>

Примечание: maps.yandex

Заповедник «Пинежский» расположен в Атлантико-Арктической климатической области умеренного пояса, для данного региона характерна среднегодовая минусовая температура [12]. Сезоны года выражены ясно: продолжительная холодная зима, относительно короткое умеренно-теплое и пасмурное лето, а также достаточно длительные весна и осень с частой сменой температур. Средняя температура января составляет $-14,7^{\circ}\text{C}$, а июля $+14,3^{\circ}\text{C}$. Неустойчивость температуры воздуха характерна как для зимнего, так и для летнего времени года, что приводит к возможности оттепелей зимой и заморозков летом. Следует отметить высокую облачность в течение года, достигающую до 280 дней, причем большее количество ясных дней отмечается в январе, марте и сентябре [11].

На ледниковых ландшафтах с карстовыми элементами водоразделы сильно заболочены, что приводит к распространению долгомошных и сфагновых еловых, сосновых и березовых лесов, а также верховых и переходных болот. Примерно половина этой территории покрыта ельниками черничными.

Карстово-ледниковый ландшафт характеризуется смешением ельников черничных и сосняков мелкотравно-черничных. В прошлом здесь часто возникали пожары, и на местах гарей теперь произрастают сосняки, березняки и

лиственничные леса с различными видами трав. Растительность карстогенного ландшафта представлена березняками и ельниками аконитовыми и разнотравьем, а также лиственничными лесами с разнотравными растениями.

Пластово-денудационный ландшафт сходен с ледниковым с карстовыми элементами за счет плоской равнины, хотя его поверхность возвышается над поверхностью последнего. Здесь также наблюдаются денудационные процессы, и растительность состоит как из моренных, так и из карстовых форм рельефа. В растительном покрове преобладают ельники черничные и болота [4].

В 2016 г. исследователем Поповым С.Ю. были внесены изменения в схему разделения территории на ландшафты путем добавления информации по ландшафтам долины р. Сотки и склона коренного берега р. Пинеги, поскольку они имеют уникальные формы рельефа, отличные от предыдущих [13]. Автор статьи отмечает, что долинный ландшафт р. Сотки включает в себя пойму реки с луговой и прибрежной растительностью в низкой пойме, а также широко-травные леса в высокой пойме. Склон коренного берега р. Пинеги характеризуется смешением растительности моренных равнин, таких как ельники черничные, с растительностью карстово-ледникового ландшафта, включающей в себя ельники разнотравные, а также сосняки.

При характеристике и определении ландшафтов, растительности заповедника обратимся к исследованиям [14], где благодаря комплексной работе с геоботаническими данными и данными дистанционного зондирования разработана и опубликована подробная геоботаническая карта заповедника «Пинежский».

В рамках настоящего исследования использовалась серия снимков со спутника Landsat 8 Level 1, полученных с помощью инструмента USGS Earth Explorer, за июнь 2016, 2020, 2022 гг. для охвата сезонных изменений растительности и температурного режима, снимки выбраны с учетом облачности и других атмосферных явлений для обеспечения максимально качественной информации.

Для получения данных о нормализованном относительном индексе растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и температуре земной поверхности – LST (Land Surface Temperature) снимки исследуемой территории были обработаны с помощью программного обеспечения QGIS 3.36.1 с последующими этапами:

Для расчёта NDVI использовались 5 (ближний инфракрасный – NIR) и 4 (красный – RED) каналы, имеющие пространственное разрешение 30 м² на пиксель.

1. Преобразование DN (цифровое число) в SR (спектральное излучение):

$$(L\lambda) = \bar{M}L * Qcal + AL$$

$\bar{M}L$ = согласно метаданным, коэффициент мультиплективного изменения масштаба для конкретного диапазона.

$Qcal$ = Температурный диапазон (B10, B11).

AL = исходя из метаданных, дополнительный коэффициент масштабирования для конкретной полосы частот.

2. Преобразование TOA в BT:

$$BT = (K_2 / (In(K_1 / L) + 1)) - 273,15$$

3. Расчет NDVI:

$$NDVI = (Band5 - Band4) / (Band5 + Band4)$$

NDVI сильно коррелирует с Pv (доля растительности), поэтому рассчитываем по формуле:

$$Pv = \text{square}((NDVI - NDVImin) / (NDVImax - NDVImin))$$

4. Расчет коэффициента излучения ε:

Коэффициент излучения (или степень черноты) – отношение энергии теплового излучения «серого тела» согласно Закону Стефана Больцмана, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре.

Для расчета коэффициента излучения использовалось следующее уравнение:

$$\varepsilon = 0,004 * Pv + 0,986$$

5. Температура поверхности суши (LST):

$$LST = (BT / (1 + (10,8 * BT / c2) * In(\varepsilon)))$$

Таким образом, для каждого снимка вычислены значения NDVI и термальных индексов на основе спектральных данных, полученных с помощью различных каналов Landsat 8.

Этот подход позволяет достоверно оценить изменения в структуре и состоянии растительного покрова и температурном режиме на исследуемой территории, что имеет важное значение для понимания динамики природных процессов и принятия эффективных решений по управлению природными ресурсами.

Основные результаты

Анализ данных индексов LST и NDVI на различных участках Пинежского заповедника в сочетании с информацией о ландшафтной структуре и геоботанических особенностях территории, позволили отследить динамику температурного режима и состояния ландшафтов заповедника. Так, минимальные температуры поверхности земли (LST) на протяжении временных отрезков существенно различаются: от 11,8°C в июне 2016 г. до 20,3°C в июне 2022 г. Максимальные температуры также варьируются, достигая 21,7°C в 2016 г. и 34,1°C в 2022 г. (рис. 2).

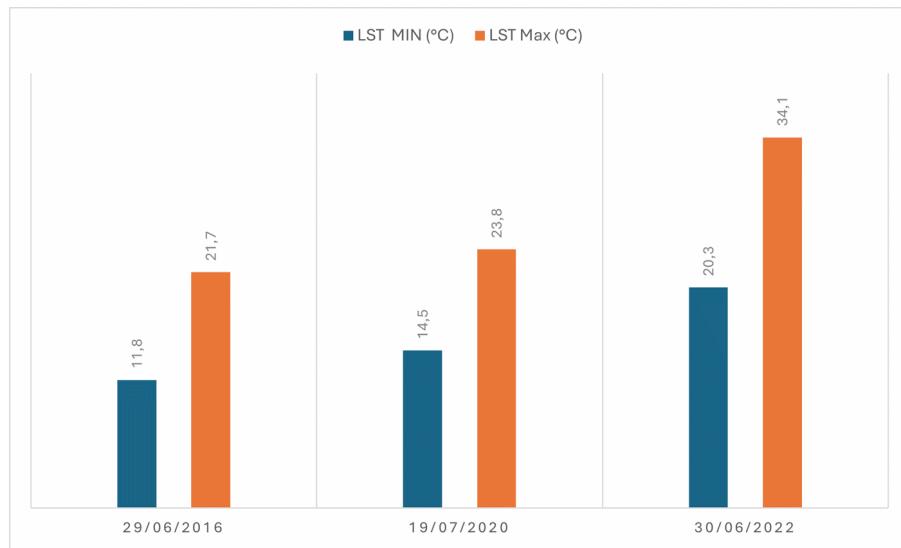


Рисунок 2 - Максимальные и минимальные значения LST на исследуемой территории
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.2>

Примечание: составлено по результатам исследования

Анализ временных рядов данных LST показывает значительные вариации минимальных и максимальных температур поверхности земли в течение исследуемого периода. Общий тренд к повышению температуры поверхности земли наблюдается в течение исследуемого периода.

В 2016 г. NDVI на территории Пинежского заповедника варьировался от -0,088 до 0,585 (рис. 3, 4).

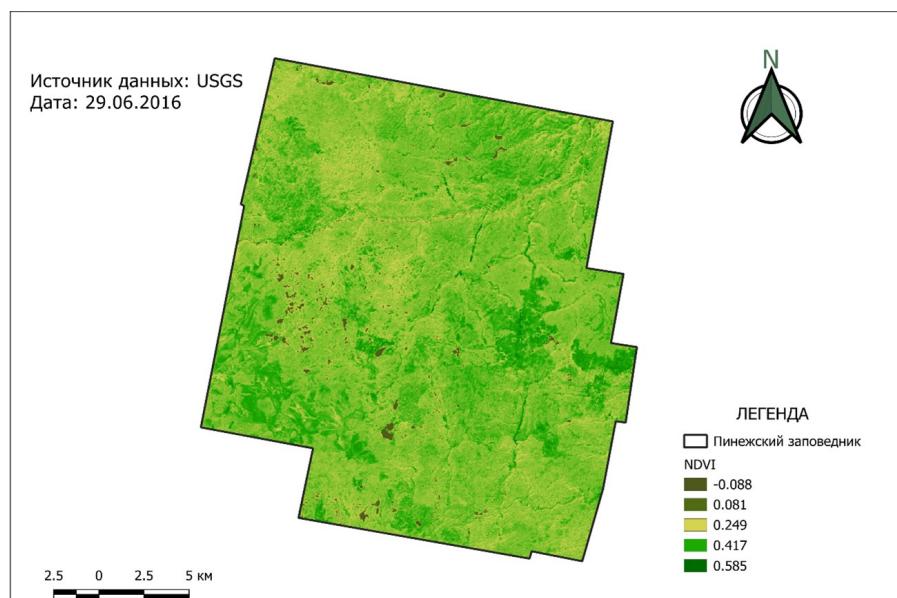


Рисунок 3 - Распределение NDVI
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.3>

Примечание: 2016; составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

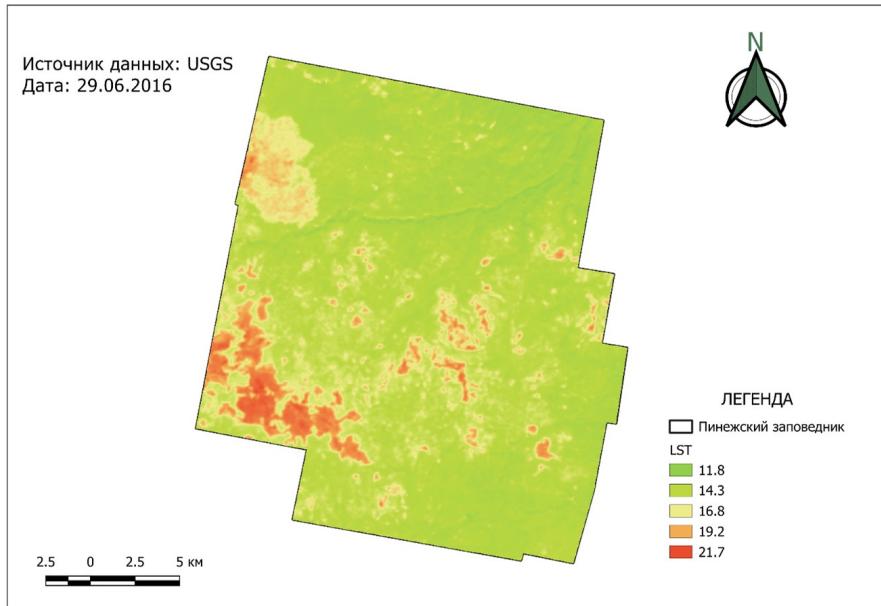


Рисунок 4 - Распределение LST
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.4>

Примечание: 2016; составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

Минимальное значение NDVI в 2020 г. составило -0,155, что указывает на низкую плотность или отсутствие растительного покрова на территории в этот период времени, а максимум оставался равным 0,585 (рис. 5, 6).

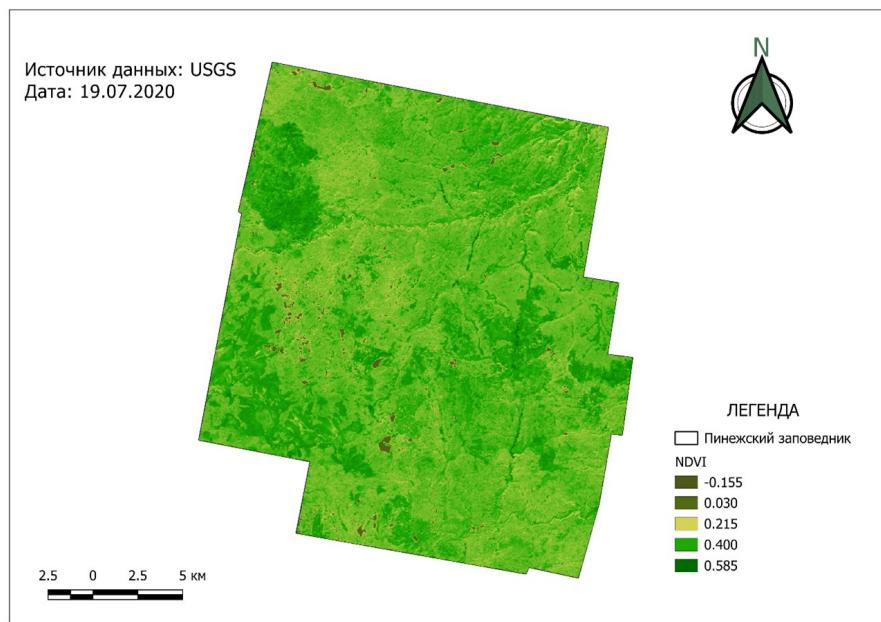


Рисунок 5 - Распределение NDVI
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.5>

Примечание: 2020; составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

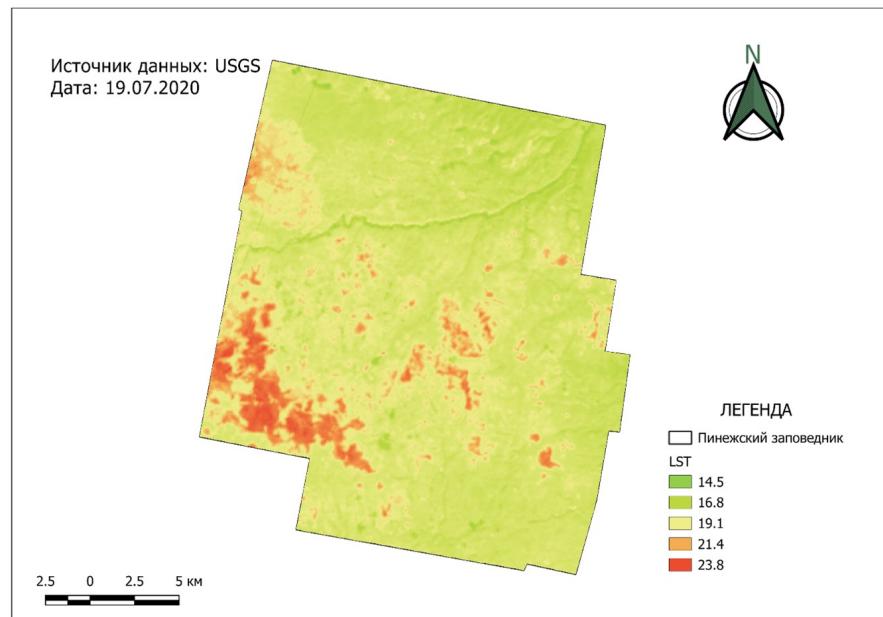


Рисунок 6 - Распределение LST
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.6>

Примечание: 2020; составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

В 2022 г. минимальное значение NDVI снизилось до -0,259, максимальное значение NDVI увеличилось до 0,607 (рис. 7, 8).

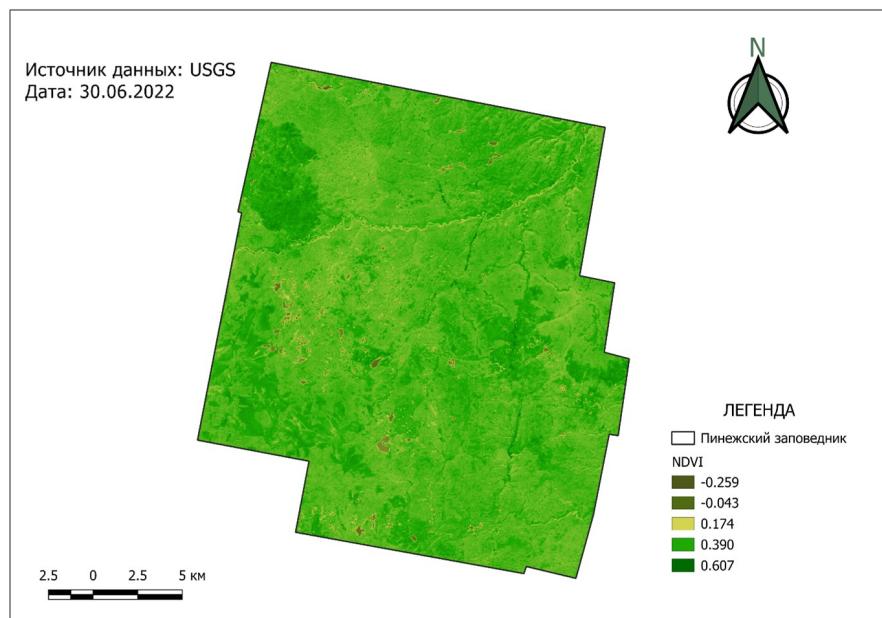


Рисунок 7 - Распределение NDVI
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.7>

Примечание: 2022; составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

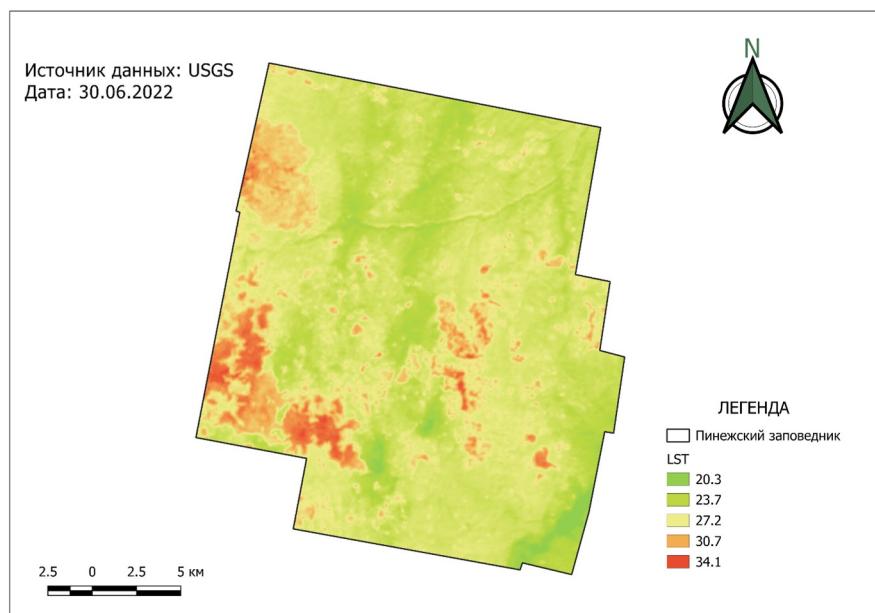


Рисунок 8 - Распределение LST
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.8>

Примечание: 2022; составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

Анализ распределения температур земной поверхности показывает, что наиболее высокие температуры за все периоды наблюдений характерны для районов распространения болотной растительности и березняков. Средние и более низкие температуры земной поверхности в большей степени характерны для ельников и пойменной растительности, и слабо отличаются для большей площади заповедника в 2016 и 2020 гг. В 2022 г. выделяются относительно большие площади с наименьшими температурами – и характерны они для сосновых лесов, расположенных на юго-востоке заповедника, и в меньшей степени – для ельников бруснично-костяничных и таволговых, получивших распространение по берегам рек и озер заповедника.

Рассмотрим изменение площадей различных диапазонов NDVI по годам. Всего выделено 7 диапазонов вариаций индекса, среди которых – максимальные значения, высокие, средние, низкие, очень низкие, минимальные, отрицательные. Низкие, минимальные и отрицательные значения практически не прорисовываются на представленном масштабе, что позволяет сделать вывод о небольшом проценте их распространения за все рассматриваемые годы.

В 2016 г. (рис. 9) максимальные значения индекса (более 0,5) выявлены для растительности, обитающей по берегам ручья Котобой (правый приток р. Сотка), р. Сотка в западной части заповедника.

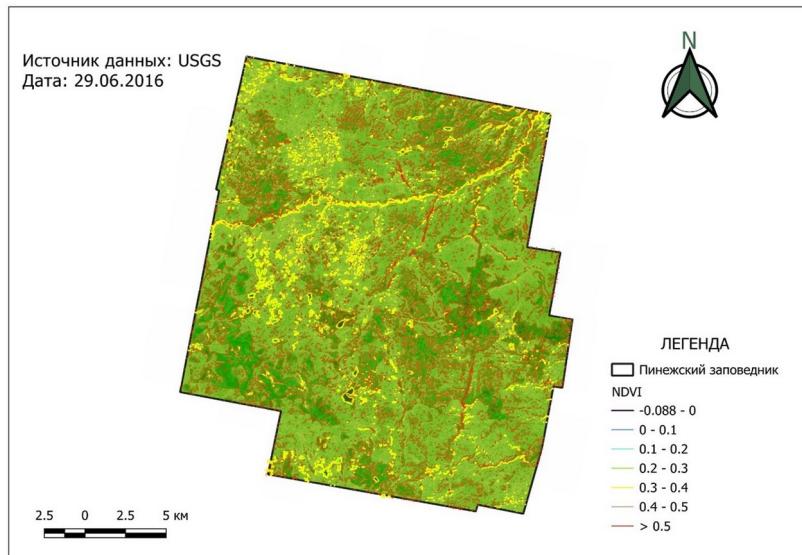


Рисунок 9 - Распределение значений NDVI на территории Пинежского заповедника 29 июня 2016 г
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.9>

Примечание: составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

Высокие значения (0,4-0,5) определены для открытых болот юго-западной части заповедника, для березняков, расположенных на левом берегу р. Сотка в северо-западном районе заповедника, ельников чернично-зеленомошных и березняков, растущих по левому берегу р. Сотка в северо-восточной части заповедника, березняков и ельников, произрастающих в восточной части, к югу от русла р. Сотка и востоку русла ручья Котобой, березняков южной части заповедника. Средние значения индекса (0,3-0,4) были характерны для сосняков и лиственничников западной части заповедника, растительных сообществ правого берега реки Сотка, а также ельников, болот и сосняков, расположенных в центральной части – к югу от русла реки Сотка и левым берегом ручья Котобой. Низкие и минимальные значения NDVI (ниже 0,3) занимали в 2016 г. небольшие, практически неразличимые в выбранном масштабе площади.

В 2020 г. (рис. 10) площади с максимальным значением NDVI (более 0,5) расширились – и определялись для тех же растительных сообществ, что и в 2016 г., а также для значительных площадей березняков, расположенных к северу от русла реки Сотка в западной части заповедника, в центральной и центрально-восточной части заповедника, к востоку от русла ручья Котобой.

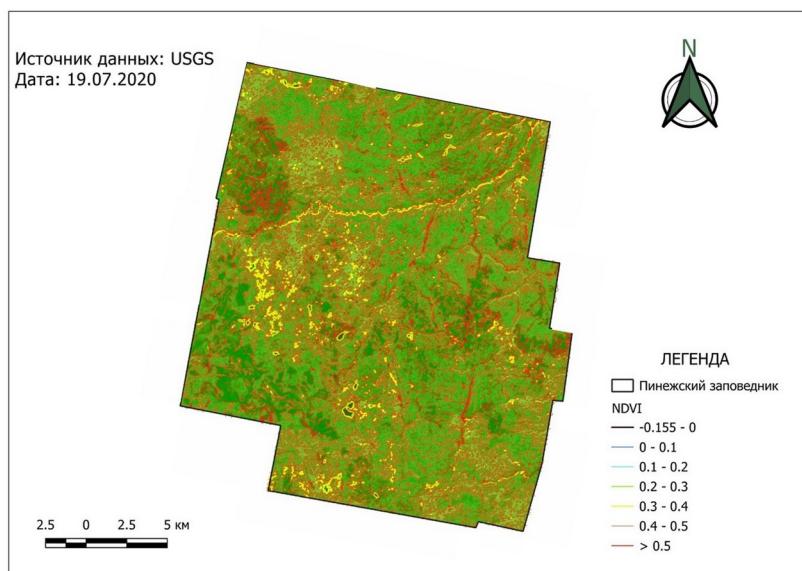


Рисунок 10 - Распределение значений NDVI на территории Пинежского заповедника 19 июля 2020 г
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.10>

Примечание: составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

Высокие значения (0,4-0,5) определены для более чем 50% площади заповедника – это вся центральная часть, сосновые леса на юго-востоке, ельники, сосновые леса и березняки, расположенные к северу от русла р. Сотка, для сосняков и лиственничников западной части заповедника. Средние значения индекса (0,3-0,4) выявлялись среди растительных сообществ правого берега реки Сотка, а также растительных сообществ, расположенных по берегам озер в западной и юго-западной частях заповедника, небольшого участка болот к югу от центральной части русла р. Сотка. Низкие и минимальные значения NDVI (ниже 0,3) занимали в 2020 г. практически неразличимые в выбранном масштабе площади.

Стоит отметить, что в 2022 г. (рис. 11) наблюдалось сокращение площадей распространения растительных сообществ с максимальным значением NDVI (более 0,5).

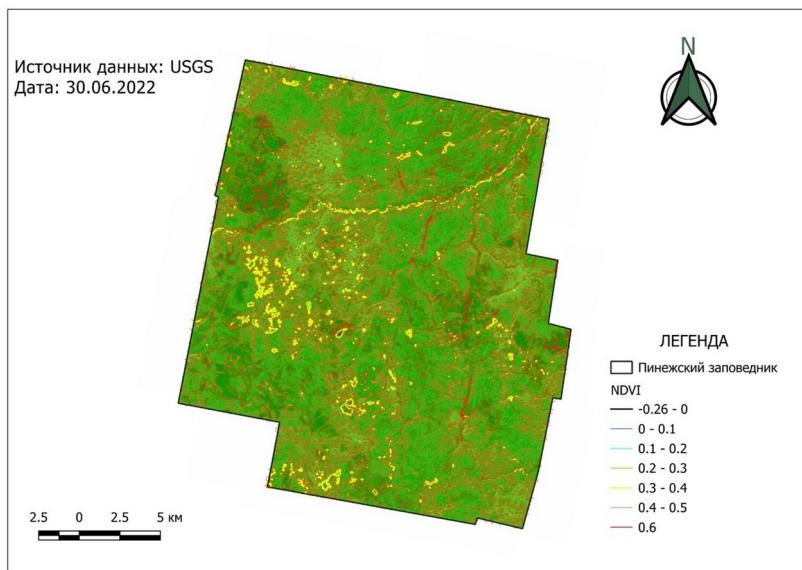


Рисунок 11 - Распределение значений NDVI на территории Пинежского заповедника 30 июня 2022 г
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.11>

Примечание: составлено авторами с использованием данных USGS [15] и программного обеспечения QGis 3.36.1

Максимальные значения NDVI были характерны для центральных массивов березняков, расположенных в северо-западной части заповедника и центрально-восточной части, растительности, обитающей по берегам ручья Котовой (в нижнем течении). Площади с высокими значениями рассматриваемого показателя (0,4-0,5) также заметно сократились и были характерны для растительных сообществ по берегам водотоков заповедника, сосняков юго-востока и северо-западных районов заповедника, березняков, ельников юго-западной части, практически всей центральной части площади заповедника. Средние значения индекса (0,3-0,4) выявлялись среди растительных сообществ правого берега р. Сотка, а также растительных сообществ, расположенных по берегам озер в западной и юго-западной частях заповедника, вокруг озер и болот к югу от центральной части русла р. Сотка, а также в растительных сообществах, обитающих вокруг озер юго-западного района. Низкие и минимальные значения NDVI (ниже 0,3) также были практически неразличимы.

Заключение

Высокие значения индекса NDVI (более 0,5) были выявлены на участках распространения березняков, что скорее всего связано с молодостью и здоровьем этих растительных формаций, высокой плотностью растительного полога, обусловленные доступностью воды и питательных веществ. Березняки – нетипичные представители таежной растительности, а результат вторичной сукцессии вследствие вырубок, гарей и высокой закарствованности пород.

Относительно низкие значения NDVI (менее 0,3) обнаружены на территориях с ельниками и сосняками, где густая хвойная растительность может ограничивать доступ солнечного света к почве, что приводит к снижению интенсивности фотосинтеза.

Повышенные значения индекса LST на участках распространения березняков и болотной растительности свидетельствуют о повышенной поверхностной температуре здесь, возможно, из-за низкого альбедо болот и более высокой теплопроводности березняков.

За выбранный период оптимальные погодные условия для вегетации растений заповедника, согласно анализу NDVI, наблюдались в 2020 г., когда были выявлены самые большие площади максимальных и высоких значений исследуемого индекса.

В целом, можно сделать вывод, что состояние растительности в различных ландшафтах заповедника в целом хорошее. Средние, низкие и минимальные значения индекса распространяются на небольшие площади, которые в данной работе из-за выбранного масштаба не отражены, и нуждаются в дополнительных исследованиях.

Наблюдаемая гетерогенность индексов NDVI и LST указывает на разнообразие микроклиматических условий и типов растительного покрова в заповеднике, что может быть обусловлено различиями в почвенном составе, влажности почвы, экспозиции склонов и другими факторами.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Клепиков О.В., Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г.Воронеж), Воронеж Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.12>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Klepikov O.V., Military Training and Research Center of the Air Force "Military Air Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh), Voronezh Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.104.12>

Список литературы / References

1. Сабуров Д.Н. Геоботаническая карта Пинежского заповедника / Д.Н. Сабуров. — М.: Фонды ГПБЗ «Пинежский», 1988.
2. Сабуров Д.Н. Леса Пинеги / Д.Н. Сабуров. — Л., 1972. — 173 с.
3. Андрейчук В.Н. Структурно-морфологический критерий классификации карстовых ландшафтов / В.Н. Андрейчук // Изучение Уральских пещер: докл. 2-й и 3-й конф. спелеологов Урала. — Пермь: Пермский гос. ун-т, 1992. — С. 101-103.
4. Рыков А.М., Рыкова С.Ю. Связь между био- и георазнообразием в областях проявления карста / А.М. Рыков, С.Ю. Рыкова // Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника. — Архангельск, 2000. — С. 201-211.
5. Попов С.Ю. Растиельность березовых и осиновых лесов Пинежского заповедника / С.Ю. Попов // Nature Conservation Research. Заповедная наука. — 2017. — №2(2). — С. 66-83
6. Попов С.Ю. Растиельность еловых лесов Пинежского заповедника / С.Ю. Попов // Nature Conservation Research. Заповедная наука. — 2016. — №1(2). — С. 38-58
7. Попов С.Ю. Структура и особенности пространственного распространения сосновых лесов Пинежского заповедника / С.Ю. Попов // Nature Conservation Research. Заповедная наука. — 2017. — №2(1). — С. 40-56
8. Рыков А.М. Ландшафтное районирование территории Пинежского заповедника / А.М. Рыков // Геодинамика и экология. Материалы международной конференции (16-18 июня 1999 г.). — Архангельск, 1999. — С. 318-319.
9. Шаврина Е.В. Особенности геологического строения, рельефа и водоносности территории / Е.В. Шаврина, В.Н. Малков // Компоненты экосистем и биоразнообразие карстовых территорий Европейского Севера России. — Архангельск, 2008. — С. 16-31.
10. Геоботаническое районирование Нечерноземья Европейской части РСФСР. — Л.: Наука, 1989. — 64 с.
11. Пинежский заповедник. — URL: <https://www.zapovednik-pinega.ru/> (дата обращения: 12.03.2024)
12. Национальный атлас России. — URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (дата обращения: 12.03.2024)
13. Попов С.Ю. Актуализация ландшафтной карты Пинежского заповедника методами многомерного анализа / С.Ю. Попов // Nature Conservation Research. Заповедная наука. — 2016. — Т. 1. — № 1. — С. 11-22.
14. Попов С.Ю. Геоботаническая карта Пинежского заповедника / С.Ю. Попов // Геоботаническое картографирование. — 2018. — С. 3-18.
15. USGS Science For A Changing world. — URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (accessed: 12.03.2024)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Saburov D.N. Geobotanicheskaja karta Pinezhskogo zapovednika [Geobotanical map of the Pinezhsky Reserve] / D.N. Saburov. — M.: Funds GPBZ «Pinezhskij», 1988. [in Russian]
2. Saburov D.N. Lesa Pinegi [Pinega forests] / D.N. Saburov. — L., 1972. — 173 p. [in Russian]
3. Andrejchuk V.N. Strukturno-morfologicheskij kriterij klassifikacii karstovyh landshaftov [Structural and morphological criterion of karst landscapes classification] / V.N. Andrejchuk // Izuchenie Ural'skikh peshher: dokl. 2-j i 3-j konf. speleologov Urala [Study of the Ural caves: reports of the 2nd and 3rd conf. of speleologists of the Urals]. — Perm: Perm State University, 1992. — P. 101-103. [in Russian]
4. Rykov A.M., Rykova S.Ju. Svaz' mezhdu bio- i georaznoobraziem v oblastjah provajlenija karsta [Relation between bio- and geodiversity in the areas of karst manifestation] / A.M. Rykov, S.Ju. Rykova // Struktura i dinamika prirodnyh komponentov Pinezhskogo zapovednika [Structure and dynamics of natural components of the Pinezhsky Reserve]. — Arkhangelsk, 2000. — P. 201-211. [in Russian]
5. Popov S.Ju. Rastitel'nost' berezovyh i osinovyh lesov Pinezhskogo zapovednika [Vegetation of birch and aspen forests of Pinezhsky Reserve] / S.Ju. Popov // Nature Conservation Research. Zapovednaja nauka [Nature Conservation Research. Reserve science]. — 2017. — №2(2). — P. 66-83 [in Russian]

6. Popov S.Ju. Rastitel'nost' elovyh lesov Pinezhskogo zapovednika [Vegetation of spruce forests of Pinezhsky Reserve] / S.Ju. Popov // Nature Conservation Research. Zapovednaja nauka [Nature Conservation Research. Reserve science]. — 2016. — №1(2). — P. 38-58 [in Russian]
7. Popov S.Ju. Struktura i osobennosti prostranstvennogo rasprostranenija sosnovykh lesov Pinezhskogo zapovednika [Structure and features of spatial distribution of pine forests in Pinezhsky Reserve] / S.Ju. Popov // Nature Conservation Research. Zapovednaja nauka [Nature Conservation Research. Reserve Science]. — 2017. — №2(1). — P. 40-56 [in Russian]
8. Rykov A.M. Landshaftnoe rajonirovanie territorii Pinezhskogo zapovednika [Landscape zoning of the territory of the Pinezhsky Reserve] / A.M. Rykov // Geodinamika i ekologija. Materialy mezdunarodnoj konferencii (16-18 iyunja 1999 g) [Geodynamics and Ecology. Materials of the International Conference (16-18 June 1999)]. — Arkhangelsk, 1999. — P. 318-319. [in Russian]
9. Shavrina E.V. Osobennosti geologicheskogo stroenija, rel'efa i vodonosnosti territorii [Features of geological structure, relief and water content of the territory] / E.V. Shavrina, V.N. Malkov // Komponenty jekosistem i bioraznoobrazie karstovyh territorij Evropejskogo Severa Rossii [Ecosystem components and biodiversity of karst territories of the European North of Russia]. — Arkhangelsk, 2008. — P. 16-31. [in Russian]
10. Geobotanicheskoe rajonirovanie Nechernozem'ja Evropejskoj chasti RSFSR [Geobotanical zoning of the Non-Black Earth Region of the European part of the RSFSR]. — L.: Nauka, 1989. — 64 p. [in Russian]
11. Pinezhskij zapovednik [Pinezhsky Reserve]. — URL: <https://www.zapovednik-pinega.ru/> (accessed: 12.03.2024) [in Russian]
12. Nacional'nyj atlas Rossii [National Atlas of Russia]. — URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (accessed: 12.03.2024) [in Russian]
13. Popov S.Ju. Aktualizacija landshaftnoj karty Pinezhskogo zapovednika metodami mnogomernogo analiza [Updating the landscape map of Pinezhsky Reserve by multivariate analysis methods] / S.Ju. Popov // Nature Conservation Research. Zapovednaja nauka [Nature Conservation Research. Reserve science]. — 2016. — Vol. 1. — № 1. — P. 11-22. [in Russian]
14. Popov S.Ju. Geobotanicheskaja karta Pinezhskogo zapovednika [Geobotanical map of the Pinezhsky Reserve] / S.Ju. Popov // Geobotanicheskoe kartografirovaniye [Geobotanical mapping]. — 2018. — P. 3-18. [in Russian]
15. USGS Science For A Changing world. — URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (accessed: 12.03.2024)