

- Sidrov A.A., Sanzhiyeva S.Ye. Khronologiya lesnykh pozharov v Respublike Buryatiya [The Chronology of forest fires in the Republic of Buryatia]. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of Kras GAU*, 2018, no. 4 (139), pp. 204–208. (In Russ.)
- Sofronova A.V., Volokitina A.V. Kartografirovaniye rastitel'nykh goryachikh materialov metodom vizual'no-instrumental'nogo deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov [Vegetation fuel mapping by the method of visual-instrumental interpretation of space images]. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*, 2017, no. 4, pp. 189–196. (In Russ.)
- Tchebakova N., Parfenova E. The 21st century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia. *Bosque*, 2012, no. 33 (3), pp. 253–259, doi: 10.4067/S0717-92002012000300004 (00.429).
- Tipy lesov gor Yuzhnoj Sibiri* [Types of forests in the mountains of Southern Siberia] / ed. by V.N. Smagin, S.A. Il'inskaya, D.I. Nazimova, I.F. Novosel'ceva, Yu.S. Cherednikova. Novosibirsk, Nauka Publ, 1980, 336 p. (In Russ.)
- Tsendbazar N., Herold M., Li L., Tarko A., Bruin S. de, Masiliunas D., Lesiv M., Fritz S., Buchhorn M., Smets B., Kerchove R. Van De, Duerauer M. Towards operational validation of annual global land cover maps. *Remote of Environment*, 2021, no. 266, 112686, doi: org/10.1016/j.rse.2021.112686.
- USGS. Earth Explorer. Available online: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Valendik E.N., Kisilyakhov E.K., Ryzhkova V.A., Ponomarev E.I., Danilova I.V. Krupnye pozhary v taezhnykh landshaftah Central'noj Sibiri [Conflagration Fires in Taiga Landscapes of Central Siberia]. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 2014, no. 35 (1), pp. 41–47, doi: 10.1134/S1875372814010065. (In Russ.)

УДК: 528.88

DOI: 10.24412/2658-4441-2021-4-51-58

А.Ф. ЧУЛЬДУМ

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)

ПОЛУЧЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ТУВЫ НА ПЛАТФОРМЕ Google Earth Engine

В настоящей работе построены карты средних значений вегетационных индексов NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI по территории республики Тыва с мая по сентябрь на период с 2000 по 2020 годы с использованием открытой облачной платформы для геопространственного анализа данных Google Earth Engine (GEE). Изучена динамика вегетационных индексов по времени. Перечислены преимущества использования открытой платформы GEE для доступа к данным дистанционного зондирования (ДЗЗ), построению карт, геопространственного анализа данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, вегетационные индексы, NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI, Google Earth Engine.

Рис. 3. Библ. 11 назв. С. 51–58.

A.F. CHULDUM

Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)

OBTAINING VEGETATION INDICES FOR TUVA ON THE Google Earth Engine PLATFORM

Maps of the average values of the vegetation indices NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR and SIPI for the territory of the Republic of Tuva from May to September for the period from 2000 to 2020 were built using an open-source cloud platform for geo-

spatial data analysis Google Earth Engine (GEE). The dynamics of vegetation indices over time has been studied. The advantages of using the open GEE platform for access to remote sensing data (ERS), mapping, geospatial data analysis are listed.

Keywords: remote sensing, vegetation indices, NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI, Google Earth Engine.

Figures 3. References 11. P. 51–58.

ВВЕДЕНИЕ. В последние годы для изучения состояния растительного покрова земли кроме наземных всё чаще и глубже привлекаются данные и методы космического дистанционного мониторинга земли (ДЗЗ) (Kurbanov, Zakharova, 2020).

Эти данные, как правило, содержат оцифрованные и преобразованные растровые данные интенсивностей отражённых электромагнитных волн в видимом и инфракрасном диапазонах определённых участков поверхности земли, полученных космическими аппаратами в определённое время и переданные на землю. В зависимости от установленных на космических аппаратах регистрирующих приёмников и аппаратуры, диапазон электромагнитного излучения разделён на каналы, где ответственна своя полоса частот. Собранные данные ДЗЗ различных проектов и миссий полётов космических станций обрабатываются различными ответственными организациями и хранятся в дата-центрах в различных форматах, в различной степени доступности. Многие научные и коммерческие организации создают свои центры хранения данных, где обрабатывают, накапливают, преобразуют исходные данные космического зондирования. Одной из таких является корпорация Google, предоставляющая открытую платформу для ДЗЗ Google Earth Engine.

Google Earth Engine (GEE) (Welcome to Google ...: электрон. ресурс) — это облачная платформа для геопространственного анализа больших данных в планетарных масштабах. Она позволяет использовать огромные вычислительные мощности компании Google, состоящие из суперкомпьютеров, объединённых в различные кластеры серверов для высокопроизводительных параллельных вычислений и больших дата-центров для хранения огромного многообразия информационных данных. Она предназначена для выполнения самых разнообразных научных исследований и решений задач: в области сельского хозяйства, лесоводства, картографии, геологии, изменения климата и защиты окружающей среды, эпидемий, стихийных бедствий, потерь лесов, засухи, наводнений, продовольственной безопасности, управления водными ресурсами и и т. д. Большая часть каталога данных состоит из полных архивов изображений дистанционного зондирования Земли, полученными миссиями спутников серии Landsat 1–8, Sentinel 1, 2, 3, 5 Р с различными уровнями обработки начиная с 1960-х годов по настоящее время. Архив постоянно пополняется петабайтами данных в день. В портале GEE имеется удобная среда разработчика программ (API), где можно создавать программы (скрипты) на языках JavaScript и Python. Созданные скрипты для работы с большими данными выполняются на многих серверах Google используя все преимущества параллельного программирования. Это даёт разработчикам значительно экономить время по работе с большими данными. Используя массив данных ДЗЗ можно изучать и оценивать состояние почвы, растительности на участке поверхности земли, строить определённые вычисляемые по данным ДЗЗ показатели состояния. Одними из таких показателей являются так называемые вегетационные индексы.

Вегетационный индекс (ВИ) — это показатель, получаемый в результате комбинаций данных интенсивностей отражения спектральных каналов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для каждого пиксела растра изображения местности (Сутырина, 2013, с. 124–139). Формулы этих комбинаций получают по эмпирическим закономерностям и позволяют полнее выделить разные характерные особенности состояния растений и почвы. Известны уже несколько сотен таких индексов, эффективно используемых в науках о земле, землепользовании и в народном хозяйстве (см. напр.: Зеньков и др., 2017) Изучая значения этих индексов для различных типов рас-

тельности, почв, территорий поверхности земли, специалисты могут оценить их состояние для дальнейшего анализа и построения моделей (Госсен и др., 2016).

Целью данной работы является построение некоторых вегетационных индексов для территории Тувы в разные годы с использованием открытой платформы GEE.

В настоящей работе нами были построены некоторые распространённые вегетационные индексы по (для) территории Тувы за период с 2000 по 2020 гг. Данный период был выбран для изучения взаимосвязей и сопоставления с некоторыми наземными данными полевых измерений за тот же период. Были выбраны следующие вегетационные индексы, значения которых чувствительны к изменениям состояния почв и растительности: NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для построения карт вегетационных индексов в среде GEE предварительно были загружены в каталог ASSET платформы GEE файлы границы Тувы в формате шейп-файлов полигонов. Далее были созданы скрипты на языке JavaScript платформы GEE. Источником данных явились обработанные и преобразованные данные миссии Landsat размещённые в каталоге Google Earth Engine под названием LANDSAT/LE07/C01/T1_TOA. Эти данные отфильтровывали по времени (напр., 2005–2010 гг.) и по пространству (внутри границы Тувы) встроенными функциями среды. Для вычислений индексов были созданы пользовательские функции в скрипте. Для индексов использовались общеизвестные формулы со следующими значениями параметров:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}),$$

$$\text{SAVI} = (1 + L) \times (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L), L = 0.2,$$

$$\text{ARVI} = (\text{NIR} - (2 \times \text{Red}) + \text{Blue}) / (\text{NIR} + (2 \times \text{Red}) + \text{Blue}),$$

$$\text{EVI} = 2.5 \times ((\text{NIR} - \text{Red}) / ((\text{NIR} + (C1 \times \text{Red}) - (C2 \times \text{Blue}) + L))), C1 = 6, C2 = 7.5, L = 1,$$

$$\text{GCI} = (\text{NIR}) / (\text{Green}) - 1,$$

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}),$$

$$\text{SIPI} = (\text{NIR} - \text{Blue}) / (\text{NIR} - \text{Red}),$$

где NIR, Red, Blue, Green — названия каналов Landsat 7, C1, C2; L — устанавливаемые параметры. Программа в дальнейшем из сформированного набора изображений вычисляла среднее значение индекса по каждому пикселу, максимальное и минимальное значения по всему массиву для построения шкалы легенды карты и дополнительной верификации.

Далее функциями создания и построения вычисленных карт, изображения выводились в браузер. Скриншот экрана с полученным изображением сохраняли на диске. Таким образом были получены файлы карт семи индексов осреднённые за пятилетия: 2000–2005, 2005–2010, 2010–2015, 2015–2020 гг. Дополнительно были построены карты индексов GCI, ARVI, соответствующие осреднённым показателям за май–июнь, июнь–июль, июль–август, август–сентябрь на пятилетия 2000–2005, 2005–2010 гг. Применяемые процедуры усреднения и выбор перекрывания интервалов дат связаны с тем, что снимки участков космической аппаратуры происходят всего два раза в месяц и в разные дни месяцев в различные годы, соответственно получаемые одиночные картины участков недостаточны для корректного сравнения и сопоставления.

Следует отметить, что если построение одной такой карты для территории Тувы производить на обычном персональном компьютере, понадобилось бы приблизительно несколько недель, а на платформе GEE отлаженный скрипт выполняется несколько секунд, и то только на возврат браузеру изображения! Затраты времени определяются в основном временем разработки программных скриптов. Ещё одним преимуществом API GEE является наличие большого количества готовых библиотек алгоритмов и методов по работе с геопривязанными изображениями, матрицами и коллекциями разнообразных данных, а также возможность свободного прозрачного обмена текстами программных скриптов через разнообразные форумы пользователей в облачном сервисе GEE. Для конкретного разработчика дополнительно предоставляется система

контроля версий, которая даёт возможность восстановления своих действий и данных с момента регистрации пользователя в облачной среде.

Недостатком данной платформы в настоящее время, как нам кажется, является ограничение по размеру файла скачиваемого растрового изображения полученного результата в формате GeoTiff, для возможной в дальнейшем обработки в других настольных программах ГИС. Этот недостаток частично можно преодолеть сегментацией большого изображения на малые и их раздельного скачивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. На *рисунках 1–3* в качестве примера представлены некоторые из карт средних вегетационных индексов, полученных осреднением в разные периоды.

EVI (Enhanced Vegetation Index) — это усовершенствованный улучшенный индекс биомассы растений, представляющий собой модификацию индекса NDVI. Этот индекс при оценке состояния растений имеет преимущества, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизировано (Лобанов и др., 2020). EVI позволяет оценивать состояние растений, как в условиях густого растительного покрова, так и в условиях разреженной растительности. Значения лежат в пределах от -1 до +1. *Рисунок 1* качественно иллюстрирует и отчётливо выделяет области, которые были покрыты растительностью в летнее время и где шёл интенсивный набор биомассы (жёлтый цвет). Более тонкое изучение вариаций значений этого показателя в разное время может позволить исследователям оценивать состояние растительности (Малинников, Хатиб, 2021).

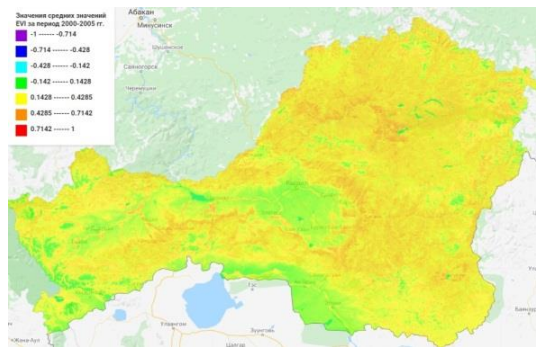


Рисунок 1. Карта среднего вегетационного индекса EVI за период 2000–2005 гг.

Вегетационный индекс SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) (см. *рис. 2*) часто используется для уточнения границ в случае преобладания травянистой растительности (Huete, 1988).

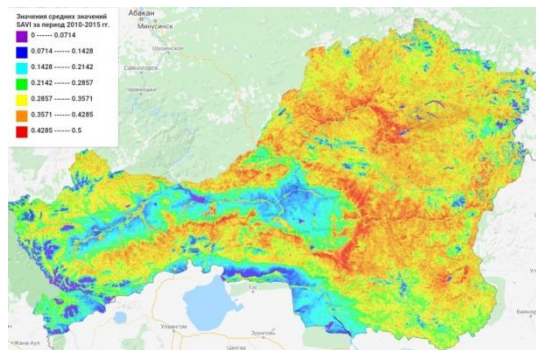


Рисунок 2. Карта среднего вегетационного индекса SAVI за период 2000–2005 гг.

Рисунок 2 иллюстрирует чётко выделенные границы разного типа растительности по Республике Тыва.

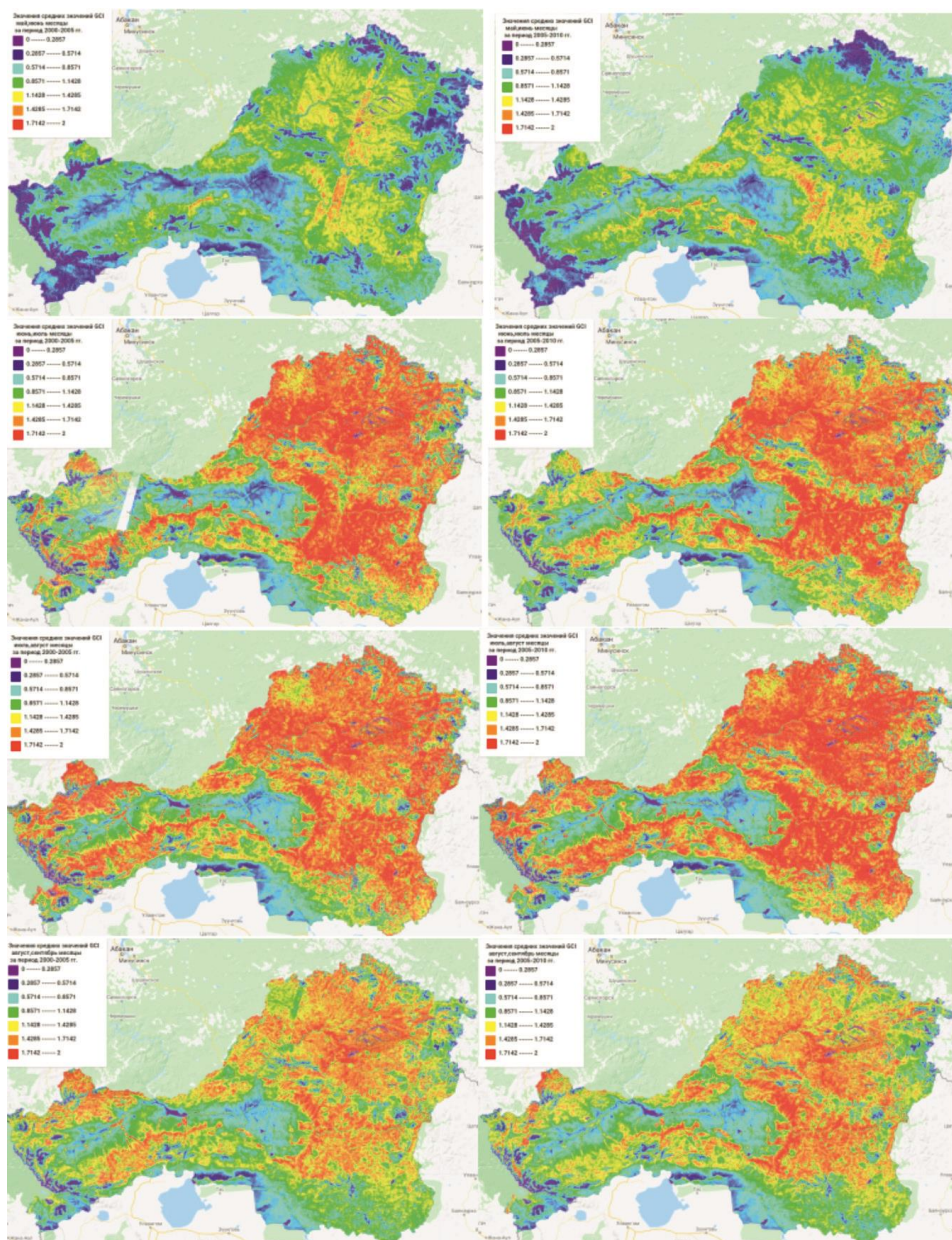


Рисунок 3. Карта среднего вегетационного индекса GCI за периоды 2000–2005 гг. и 2005–2010 гг. (пояснение в тексте статьи)

На *рисунке 3* представлены последовательные, осреднённые по скользящему двухмесячному периоду карты значения индекса GCI. По вертикали сверху вниз соответственно: май – июнь, июнь – июль, июль – август, август – сентябрь.

Левая половина рисунка соответствует периоду 2000–2005 гг., правая — 2000–2005 гг. Индекс GCI (Green Chlorophyll Index) чувствителен к содержанию хлорофилла в листьях у различных видов растений и отражает физиологическое состояние растительности. Показатель снижается у растений, подвергшихся стрессу, и поэтому может использоваться в качестве измерения здоровья растений. По *рисунку 3* можно

проследить как от весны (верхняя часть рисунка) к осени (нижние части рисунка) возрастают и убывают значения этого индекса для растительного покрова. По едва заметным изменениям левой половины соответствующей 2000–2005 годам от правой половины, соответствующей 2005–2010 годам, можно качественно оценить изменения состояния растительного покрова за пятилетие. Так, на *рисунке 3* видны отдельные участки внутри областей лесного массива, подвергавшихся пожарам в это пятилетие. Верификация и уточнение границ пожаров также возможна, напр., по результатам (Куулар и др., 2021). Линейные артефакты на рисунке объясняются происшедшими время от времени смещениями спутников от орбиты. Более детальное изучение значений показателей индексов в будущем позволит более детально изучить состояние почв и растительности по построенным картам ВИ для различных участков местности. В частности, наличие на платформе готовых алгоритмов автоматической кластеризации позволяет легко провести намного лучшую процедуру кластеризации чем, напр., в (Чульдум, 2019).

Использование временной динамики этих показателей открывает широкие возможности для моделирования состояния биосферы (Кустов и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Таким образом, платформа GEE является удобной средой для тех, кто имеет дело с геоинформатикой и даёт следующие преимущества:

1. Нет необходимости искать, загружать и хранить большое количество данных дистанционного зондирования земли из космоса в дисках персонального компьютера — все они будут под рукой в каталогах облачных хранилищ.
2. Не требуется отдельно вычислять индексы для нескольких сотен и тысяч снимков и строить результирующую мозаику из блоков (по причине недостатка оперативной памяти для персональных компьютеров, требуется сотни гигабайт) — на серверах они распараллеливаются, вычисляются независимо и объединяются в одно результирующее изображение мгновенно.
3. Для большинства типичных задач обработки космических изображений отпадает необходимость покупки дорогостоящих программных продуктов ГИС.
4. Наличие большого количества серверов Google с суперкомпьютерами с параллельной обработкой можно решать сложные многоэтапные задачи вплоть до планетарного масштаба за минимальное время.
5. Наличие среды разработки с системой контроля версий даёт разработчикам удобный сервис для создания библиотеки собственных скриптов для решения разнообразных задач геоинформатики.

К недостаткам следует отнести ограничение размера загружаемых с сервера промежуточных результатов геообработки изображений ДЗЗ в формате GeoTiff и обязательное наличие интернет связи для разработчика.

Построенные электронные карты вегетационных индексов: NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI для Республики Тыва могут найти применение при изучении состояния почв и растительности для биологов, экологов, географов и других специалистов областей наук о земле.

ЛИТЕРАТУРА

- Госсен И.Н., Кулижский С.П., Данилова Е.Б., Соколов Д.А. Бонитировочный подход к оценке почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов Сибири (на примере отвалов антрацитовых, каменноугольных и буроугольных месторождений) // Вестн. Новосибирского гос. аграрного ун-та. – 2016. – № 2. – С. 71–82.
- Зеньков И.В., Баркова В.И., Нефедов Б.Н., Логинова Е.В., Ямских И.Е. Результаты полевых исследований и дистанционного мониторинга формирования экосистем на территории горно-промышленного ландшафта угольного разреза «Изыхский» // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 1. – С. 36–41.

- Кустов М.В., Зарубин О.А., Саулин В.А., Авдюшкина Ю.Н., Токарев А.А. Пространственно-временной анализ изменения состояния растительности по данным дистанционного зондирования земли (на примере зоны строительства юго-западного шоссе в г. Саранск) // *Современные проблемы территориального развития*. – 2018. – № 3. – С. 9.
- Куулар Х.Б., Чульдум А.Ф., Хертек С.Б., Намзын Ш.А. Пространственно-временное распределение весенней горимости растительного покрова республики Тыва в 2000–2020 гг. // *Природные ресурсы, среда и общество: Электрон. науч. журн. [Электрон. ресурс]*. – 2021. – № 2 (10). – С. 18–22. – Режим доступа: <http://tikopr-journal.ru/images/2021/02/ART/02.pdf>, свободный.
- Лобанов Г.В., Чарочкина А.Ю., Авраменко М.В., Дроздов Н.Н. Ландшафтная интерпретация различий сезонной динамики вегетационного индекса EVI поверхности пахотных земель Брянской области // *Вестн. северо-восточного федерального ун-та им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*. – 2020. – № 3 (19). – С. 25–35.
- Малинников В.А., Хатиб А. Анализ информативности зональных и индексных спутниковых изображений в детектировании деградации средиземноморских лесов // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2021. – № 2 (48). – С. 47–52.
- Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: Учеб. пособие. – Иркутск: ИГУ, 2013. – 165 с.
- Чульдум А.Ф. Мягкая кластеризация методом с-средних особенностей растительности и почвы участков Тувы по многозональным космоснимкам // *Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: Материалы III-й Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию ТувИКОПР СО РАН и 45-летию академической науки в Туве (23–25.10.2019, Кызыл, Россия) / Под общ. ред. Г.Ф. Балакиной; отв. ред. В.О. Ооржак [Электрон. ресурс: март 2020]*. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2019. – С. 393–397. – Режим доступа: <http://www.tikopr.sbras.ru/>, свободный.
- Huete A.R. A Soil — Adjusted Vegetation Index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – Vol. 25. – № 3. – P. 295–309.
- Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops // *Agricultural Machinery and Technologies*. – 2020. – Т. 14. – № 4. – С. 4–11. – DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
- Welcome to Google Earth Engine. – Available at: <https://developers.google.com/earth-engine>.

REFERENCES

- Chul'dum A.F. Myagkaya klasterizatsiya metodom s-srednikh osobennostey rastitel'nosti i pochvy uchastkov Tuvy po mnogo-zonal'nym kosmosnimkam [Soft clustering by the method of c-average characteristics of vegetation and soil in Tuva areas based on multispectral satellite images]. *Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura [Regional economy: technologies, economics, ecology and infrastructure]: Proceedings of the III International scientific-practical conference, dedicated 25th anniversary of TuvIENR SB RAS and 45th anniversary of academic science in Tuva (23–25.10.2019, Kyzyl, Russia) / ed by G.F. Balakina; V.O. Oorzhak*. Kyzyl, TuvIENR SB RAS, 2019, pp. 393–397. Available at: <http://www.tikopr.sbras.ru/>. (In Russ.)
- Gossen I.N., Kulizhskiy S.P., Danilova Ye.B., Sokolov D.A. Bonitirovochnyy podkhod k otsenke pochvenno-ekologicheskogo sostoyaniya tekhnogennykh landshaftov Sibiri (na primere otvalov antratsitovykh, kamennougol'nykh i burougol'nykh mestorozhdeniy) [A grading approach to assessing the soil-ecological state of technogenic landscapes in Siberia (on the example of dumps of anthracite, coal and brown coal deposits)]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University*, 2016, no. 2, pp. 71–82. (In Russ.)
- Kustov M.V., Zarubin O.A., Saulin V.A., Avdyushkina Yu.N., Tokarev A.A. Prostranstvenno-vremennoy analiz izmeneniya sostoyaniya rastitel'nosti po dannym distantsionnogo zondirovaniya zemli (na primere zony stroitel'stva yugo-zapadnogo shosse v g. Saransk) [Spatial and time analysis of changing in the vegetation condition by earth remote sensing data (on the example of the building zone along the south-west highway in Saransk)]. *Sovremnyye problemy territorial'nogo razvitiya = Modern problems of territorial development*, 2018, no. 3, pp. 9. (In Russ.)
- Kuular Kh.B., Chul'dum A.F., Khertek S.B., Namzyn Sh.A. Prostranstvenno-vremennoye raspredeleniye vesenney gorimosti rastitel'nogo pokrova respubliky Tyva v 2000–2020 gg. [Spatial and time analysis of changing in the vegetation condition by earth remote sensing data (on the example of the building zone along the south-west highway in Saransk)]. *Sovremnyye problemy territorial'nogo razvitiya = Modern problems of territorial development*, 2018, no. 3, pp. 9. (In Russ.)

- temporal distribution of spring wildfire danger in Tyva Republic within 2000–2020 years]. *Prirodnyye resursy, sreda i obshchestvo* = Natural resources, environment and society, 2021, no. 2 (10). pp. 18–22. Available at: <http://tikopr-journal.ru/images/2021/02/ART/02.pdf>. (In Russ.)
- Lobanov G.V., Charochkina A.Yu., Avramenko M.V., Drozdov N.N. Landshaftnaya interpretatsiya razlichiy sezonnoy dinamiki vegetatsionnogo indeksa EVI poverkhnosti pakhotnykh zemel' Bryanskoy oblasti [Landscape interpretation of differences in the seasonal dynamics of the vegetation index EVI of the surface of arable land in the Bryansk region]. *Vestnik severo-vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle* = *Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Series: Earth Sciences*, 2020, no. 3 (19), pp. 25–35. (In Russ.)
- Malinnikov V.A., Khatib A. Analiz informativnosti zonal'nykh i indeksnykh sputnikovykh izobrazheniy v detektirovaniy degradatsii sredizemnomorskikh lesov [Analysis of the information content of zonal and index satellite images in detecting the degradation of Mediterranean forests]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* = *Monitoring. Science and technology*, 2021, no. 2 (48), pp. 47–52. (In Russ.)
- Neverova O.A., Yeremeyeva N.I. *Opyt ispol'zovaniya bioindikatorov v otsenke zagryazneniya okruzhayushchey sredy. Analiticheskiy obzor* [Experience of using bioindicators in assessing environmental pollution. Analytical review]. – Novosibirsk, GPNTB, 2006, 88 p. (In Russ.)
- Sutyryna Ye.N. *Distantsionnoye zondirovaniye Zemli* [Remote sensing of the Earth]: allowance. Irkutsk, Irkutsk State University, 2013, 165 p. (In Russ.)
- Zen'kov I.V., Barkova V.I., Nefedov B.N., Loginova Ye.V., Yamskikh I.Ye. Rezul'taty polevykh issledovaniy i distantsionnogo monitoringa formirovaniya ekosistem na territorii gornopromyshlennogo landshafta ugol'nogo razreza «Izykhskiy» [Results of field research and remote monitoring of the formation of ecosystems on the territory of the mining landscape of the Izykhsky coal mine]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = *Ecology and Industry of Russia*, 2017, vol. 21, no. 1, pp 36–41. (In Russ.)
- Huete A.R. A Soil — Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. – 1988, vol. 25, no. 3, pp. 295–309.
- Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops // *Agricultural Machinery and Technologies*, 2020, vol. 14, no. 4, pp. 4–11, doi 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
- Welcome to Google Earth Engine. Available at: <https://developers.google.com/earth-engine>.