

Совместный анализ радарных и многоспектральных данных спутников семейства Sentinel для мониторинга городской растительности

Ж. Б. Нгуа Ндонг Авеле

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
avelejacques@yahoo.fr

В. С. Горяинов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
vsgoriainov@etu.ru

Аннотация. Спутники Sentinel-1 (несут на борту радары с синтезированной апертурой) и Sentinel-2 (оснащены многоспектральными камерами) представляют ценный инструмент для мониторинга окружающей среды, в том числе растительности и эрозии почв. В ходе данного исследования, областью которого является остров Котлин (Санкт-Петербург), мы использовали два взаимно дополняющих набора спутниковых изображений для оценки того, как их совместное применение может усовершенствовать технологию дистанционного мониторинга растительности. Вначале была выполнена раздельная подготовка данных Sentinel-1 и Sentinel-2. Затем мы проанализировали пространственное распределение растительности, используя каждый из датасетов в отдельности. Проведено сравнение индексов растительности, рассчитанных на основе данных Sentinel-2, с коэффициентами обратного рассеяния Sentinel-1. С учетом корреляций этих величин рассматривались соотношения между плотностью растительности, влажностью почвы и общим содержанием воды. Наконец, использование статистического подхода позволило объединить преимущества обоих датасетов. Полученные результаты показывают, что совместный анализ данных позволил более точно определять участки, подверженные эрозии, в областях без растительности, а также поспособствовал оценке содержания влаги в растениях.

Ключевые слова: семейство спутников Sentinel; радар с синтезированной апертурой; многоспектральная съемка; нормализованный вегетационный индекс; радарный вегетационный индекс; мониторинг растительности

I. ВВЕДЕНИЕ

Городская растительность необходима для поддержания экологического равновесия в крупных городах, повышения эстетической привлекательности и смягчения экологических проблем, таких как эрозия почвы и затопление дождевой водой. Кронштадт, расположенный на острове Котлин в Санкт-Петербурге, представляет собой интересный случай, когда часть густонаселенного города изолирована своим географическим положением. Постоянный мониторинг городских зеленых насаждений необходим как для обеспечения здоровья растений, так и для стабильности почвы. Традиционные полевые исследования требуют

больших средств и времени, не обеспечивая при этом пространственного охвата, необходимого для всеобъемлющей оценки. Это исследование сосредоточено на использовании радиолокационных изображений высокого разрешения совместно с многоспектральными данными со спутников Sentinel-1 и Sentinel-2. Радарные данные позволяют получить представление о структурных характеристиках растительности, в то время как многоспектральные данные предоставляют информацию о состоянии растений в различных спектральных диапазонах [1].

Объединяя данные со спутников Sentinel-1 (радар с синтезированной апертурой – SAR) и Sentinel-2 (многоспектральные изображения), мы можем получить подробную и точную картину состояния растительности. Радарные импульсы Sentinel-1 проникают сквозь облачный покров и предоставляют ценную информацию о влажности почвы даже при неблагоприятных погодных условиях. Это крайне важно для выявления участков, подверженных подтоплению, которое является серьезной угрозой здоровью растений и основной причиной эрозии почвы. Многоспектральные изображения спутников Sentinel-2 обеспечивают основу для расчета вегетационных индексов, таких как нормализованный вегетационный индекс, и содержания хлорофилла, что должно позволить оценивать распределение и общее состояние городской растительности [2].

II. АНАЛИЗ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА НАБОРОВ ДАННЫХ

Наборы данных для этого исследования были получены с помощью платформы Sentinel Hub Европейского космического агентства (ESA), которая удобна в использовании и предлагает инструменты для визуализации, формирования выборок и базового анализа данных. Потенциальные применения наборов данных, полученных таким образом, включают реагирование на стихийные бедствия, точное земледелие и мониторинг изменения климата, способствуя сотрудничеству и распространению знаний в научном сообществе [3]. На рис. 1 представлена область исследования.

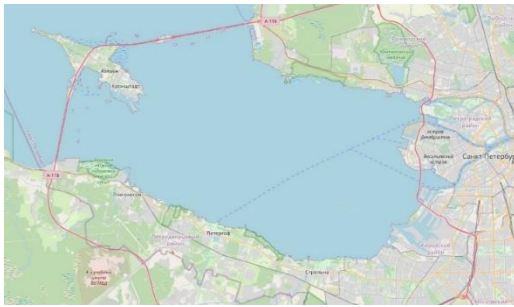


Рис. 1. Положение о. Котлин на географической карте Санкт-Петербурга

III. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ НАБОРОВ ДАННЫХ

По данным многоспектральной съемки и радарного зондирования были рассчитаны нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и радарный вегетационный индекс (RVI) соответственно:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

$$RVI = 4VH / (VH + VV), \quad (2)$$

где NIR и RED обозначены нормированные яркости пикселей в инфракрасном и красном каналах, а VH, VV – степени горизонтальной и вертикальной поляризации радарного сигнала.

На рис. 2 сравнивается распределение растительности, полученное путем расчета индексов NDVI и RVI для начала лета с 2018 по 2024 год.

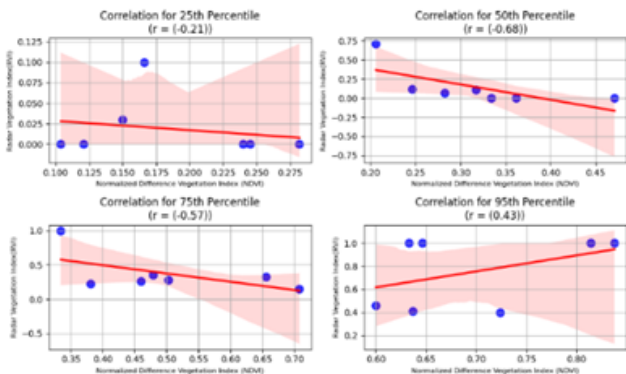


Рис. 2. Корреляция между NDVI и RVI в различных перцентилях распределения растительности

Наиболее сильные корреляции наблюдаются в 50-м и 75-м перцентилях, показывая, что пространственное распределение растительности наиболее предсказуемо в районах с умеренной растительностью. Однако мы можем заключить, что слабая корреляция при низком уровне растительности в медианном перцентиле и обратная тенденция при очень высокой плотности растительности в 95-м перцентиле предполагают ограничения взаимной заменимости NDVI и RVI для зон с разреженной и высокоплотной растительностью. Используя абсолютные значения коэффициентов корреляции для количественной оценки точности, можно предположить 47 % точность прогнозирования распределения растительности, когда мы анализируем оба индекса без использования комбинированного

подхода. В районе с низкой плотностью растительности существует слабая корреляция между индексом влажности, нормализованным вегетационным индексом и радарным вегетационным индексом. При независимой обработке обоих показателей (RVI и NDVI) трудность представляет исключение влияния воды, содержащейся в растениях, и эрозии на участках, не покрытых растительностью. Предлагаемое решение для мониторинга содержания воды в растениях и эрозии заключается в определении корреляции распределений нормализованного вегетационного индекса и радарного вегетационного индекса с индексом влажности и нормализованным разностным водным индексом. С помощью этого статистического объединения можно сравнить результат с другими наборами данных, предоставленными спутниками Sentinel, такими как коэффициент отражения в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) и индекс обнаженной почвы (NDBSI). Как правило, содержание воды в растениях и эрозия не представляют существенных затруднений до тех пор, пока наблюдаются значения $NDVI > 0,4$ и $RVI > 0,3$, поскольку они обеспечивают 75–85 % предсказуемость удержания влаги. Что касается мониторинга эрозии в районах, не покрытых растительностью, приоритетом должно быть повышение NDVI в зонах с низким растительным покровом (25-й перцентиль), поскольку риск эрозии там самый высокий и составляет 70–80 %. RVI в отдельности менее надежен, и его следует комбинировать с NDVI для более точной оценки содержания влаги. Процент предсказуемости для эрозии при обработке независимо друг от друга NDVI и RVI составляет около 20–30 % при низкой плотности растительности, 30–40 % при плотной растительности и только 10–20 % в 75-м перцентиле. Таким образом, объединение обоих типов данных может повысить точность анализа.

В настоящее время не существует общепринятого метода объединения данных NDVI и RVI, хотя имеется ряд подходов. Наше предложение включает взвешенную линейную комбинацию, как можно видеть из формулы:

$$F = \omega_1 NDVI + \omega_2 RVI, \quad (3)$$

где ω_1 и ω_2 – это веса, отражающие относительную значимость обоих индексов для конкретного приложения; два значения ω_1 и ω_2 в сумме должны давать 1, чтобы гарантировать, что совокупный индекс придерживается такого же масштаба. Оптимальные веса иногда определяются эмпирически, возможно, с помощью методов оптимизации на основе достоверных данных. Мы предлагаем три иллюстративных сценария, подчеркивающих эту гибкость в выборе весов:

- Равенство весов ($\omega_1 = \omega_2$): Этот подход рассматривает индексы NDVI и RVI как одинаково важные и подходящие, когда оба набора данных обладают, например, одинаковым качеством и важностью для анализа.
- Преобладание веса RVI ($\omega_1 < \omega_2$): В регионах, подверженных облачному покрову, затрудняющему определение NDVI оптическим методом, где упор делается на RVI, когда $\omega_2 > 0,5$, обеспечивает надежность за счет

приоритизации постоянно доступных радиолокационных данных. Этот случай особенно полезен для мониторинга растительности в районах с частой облачностью;

- Веса с преобладанием NDVI ($\omega_1 > \omega_2$): Этот случай соответствует задачам, в которых основной целью является оценка фотосинтетической способности.

На рис. 3 показан график для визуализации взаимосвязи между индексом влажности и водным индексом за период с 2018 по 2024 год.

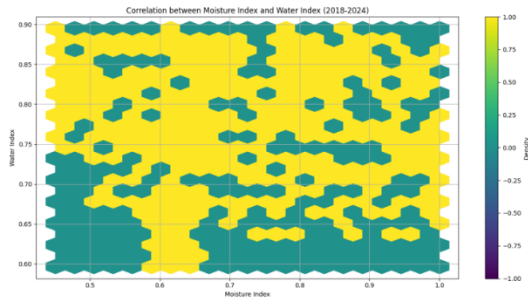


Рис. 3. Взаимосвязь между индексом влажности и водным индексом за период с 2018 по 2024 год для острова Котлин

Желтая область соответствует более высоким плотностям, а зеленая – более низким. На графике наблюдается общая тенденция, при которой более высокие значения индекса влажности (выше 0,7), как правило, соответствуют более высоким значениям влажности (выше 0,75). Низкая плотность зеленого цвета приходится на средний диапазон значений (около 0,6–0,75), а самые высокие плотности находятся в диапазоне (0,7–0,9). Этот анализ подтверждает корреляцию от умеренной до сильной между влажностью и водным индексом.

На рис. 4, 5 и 6 показаны результаты расчета корреляции между значениями линейной комбинации (3) с $\omega_1 < \omega_2$ и индексом влажности.

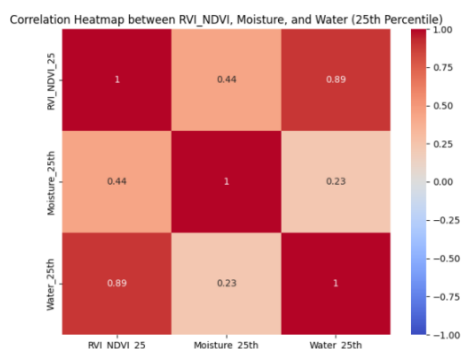


Рис. 4. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 < \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (25-й перцентиль)

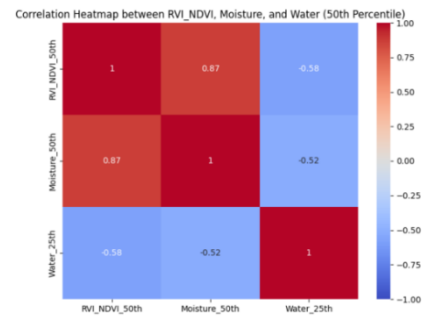


Рис. 5. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 < \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (50-й перцентиль)

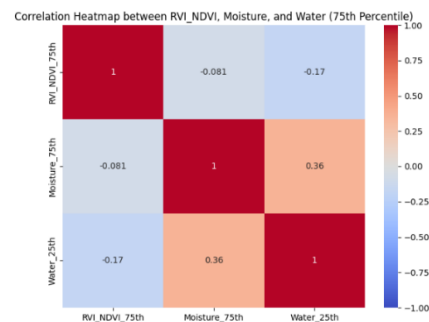


Рис. 6. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 < \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (75-й перцентиль)

Сравнивая значения корреляции, можно заметить, что на 25-м и 50-м перцентилях индекс влажности сильно коррелирует с влажностью до 0,7, но показывает отрицательную связь с водным индексом – на 50-м перцентиле до $-0,58$. Это указывает на то, что растительность сильно зависит от влажности почвы. Но для значений 75-го перцентиля влияние влажности уменьшается, и корреляция с водой становится слабее или отрицательной. В годах 2018, 2023 и 2024 годов были самые низкие значения осадков, что указывает на более засушливые условия. Годы с большим количеством осадков, такие как 2020 и 2021, соответствуют более сильной корреляции между значениями при комбинированном подходе и влажностью, поскольку растительность активнее развивается в более влажных условиях. А 2018, 2023 и 2024 годы соответствуют более слабой корреляции из-за стресса растений.

Второй случай, который иллюстрируют рис. 7, 8 и 9 – это комбинированный подход (3) с $\omega_1 > \omega_2$. На 25-м перцентиле значения значения линейной комбинации имеют отрицательную корреляцию с содержанием воды (примерно $-0,49$) и индексом влаги (около $-0,46$). На 75-м перцентиле присутствует отрицательная корреляция с водным индексом ($-0,31$), в то время как корреляция с влажностью слабее ($-0,18$). Это может указывать на то, что при плотном растительном покрове почвенная влага удерживается неэффективно. Это возможно благодаря эффекту транспирации. Малое количество осадков в 2018, 2023 и 2024 годах соответствует более слабым корреляциям, особенно в районах с обнаженной почвой, где растительность не удерживает влагу.

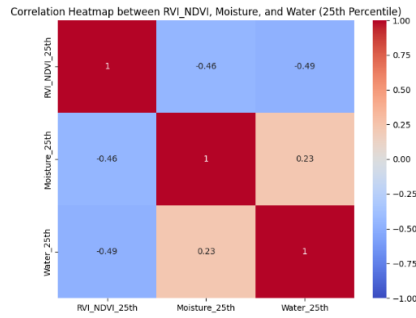


Рис. 7. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 > \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (25-й перцентиль)

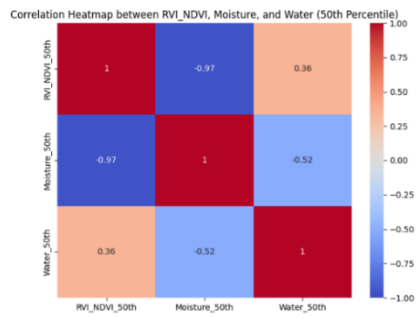


Рис. 8. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 > \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (50-й перцентиль)

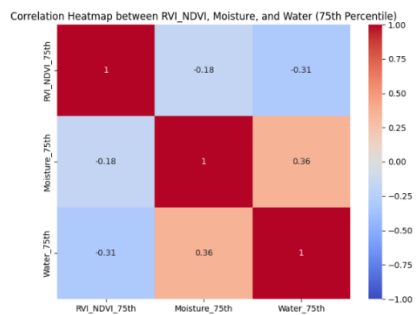


Рис. 9. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 > \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (75-й перцентиль)

Наш третий случай, показанный на рис. 10, 11 и 12, показывает комбинированный подход, заданный формулой (3) при $\omega_1 = \omega_2$. На 25-м перцентиле корреляция между индексом воды и значениями комбинированного метода составляет около 0,011. Это свидетельствует о слабом представлении присутствия воды в условиях редкой растительности. Вблизи медианы корреляция сильнее со значением, равным – 0,59, то есть в умеренных условиях наблюдается обратная зависимость. На 75-м перцентиле корреляция между индексом влажности и значениями комбинированного метода выше и составляет около 0,73. Это означает, что в условиях высокой влажности обеспечивается лучшее представление о содержании воды в растениях.

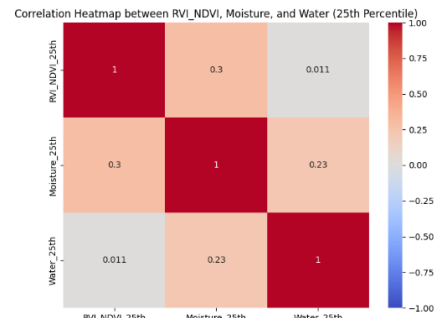


Рис. 10. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 = \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (25-й перцентиль)

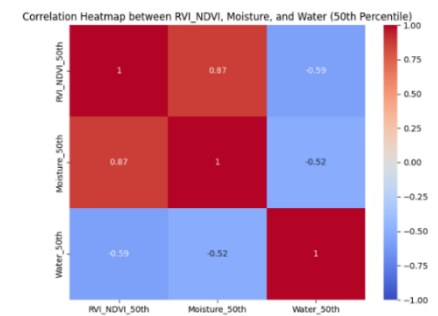


Рис. 11. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 = \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (50-й перцентиль)

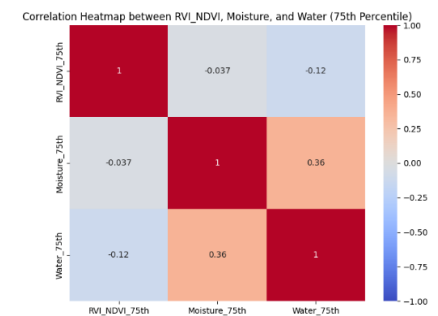


Рис. 12. Корреляция между значениями линейной комбинации (3) при $\omega_1 = \omega_2$, индексом влажности и содержанием воды (75-й перцентиль)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинированный подход с $\omega_1 < \omega_2$ эффективен для определения доступности воды для растений, но менее надежен для прогнозирования влажности на обнаженных участках. Он обеспечивает достоверность 60–75 % для определения содержания влаги в растительности и 40–45 % для прогнозирования эрозии почвы. Второй случай, с $\omega_1 > \omega_2$, предсказывает удержание воды с вероятностью 65–75 %, а для обнаженных почв точность ниже и составляет 45–55 % из-за отрицательной корреляции. Последний случай, когда $\omega_1 = \omega_2$, более надежен при прогнозировании удержания влаги растениями, с точностью 70–75 % во влажных условиях, и менее надежным, с показателем 40–50 %, при обнаружении подверженной эрозии обнаженной почвы, особенно в сухих условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Physics-based fusion of Sentinel-2 and Sentinel-3 for higher resolution vegetation monitoring / A. Kallel, M.D Mura, S. Fakhfakh, N.B. Romdhane // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 2023. Т. 99. С. 1-1. DOI:10.1109/TGRS.2023.3257219
- [2] Roßberg T., Schmitt M. Dense NDVI time series by fusion of optical and SAR-derived data // IEEE Journal of selected topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024. Т. 17. С. 7748-7758. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3379838
- [3] Fusion of optical and SAR images via NDVI-like images to reconstruct NDVI time series in cloud-prone regions / Y. Liang, Y. Deng, J. Li, Y. Li, F. Li, S. Zhang // IGARSS 2024: 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024. С. 9307-9310. DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641085.