

И.И. Стрельников, А.З. Глухов, А.В. Николаева, К.В. Мудрецова

ПОДГОТОВКА ЦИФРОВЫХ КАРТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДОНБАССЕ

Государственное учреждение «Донецкий ботанический сад»

ГИС является ценным инструментом экологических исследований, но их внедрению препятствует недостаточное количество подходящих картографических материалов. Для решения этой проблемы были подготовлены стандартизированные карты территории Донбасса с прозрачным указанием методик их получения. В финальный набор вошли карты аккумуляции поверхностного стока, карты характеристик рельефа и карты распространенных вегетативных индексов. Карты могут быть свободно скачаны по адресу https://gitlab.com/ivanstrel/dpr_eco_maps.git.

Ключевые слова: гидрологические карты, орографические карты, вегетативные индексы

Введение

Географические карты всегда были ценным инструментом в экологических исследованиях. Они незаменимы, как источник пространственной и атрибутивной информации, например, карты характеризующие местообитания или отображающие границы распределения видов [1].

Сложность и многогранность экологических исследований требует задействования большого количества источников, а также техник обработки данных.

В обоих случаях конвенционные бумажные карты имеют существенные ограничения. Прежде всего, это проблема хранения достаточных объемов данных в разных масштабах. Еще более критичной является проблема низкой скорости обновления информации.

Лишь недавно указанные проблемы были решены с помощью компьютеризированных картографических решений. Взаимное развитие географии, информационных технологий и математического аппарата пространственного анализа привели к возможности объединить собственно наборы данных с инструментами их обработки. Практическую реализацию такого синтеза принято называть географическими информационными системами или ГИС [2].

Несмотря на бурное развитие ГИС за последние 20 лет, внедрение этих технологий в практику экологических исследований остается фрагментарным. Одна из причин медленного распространения ГИС состоит в отсутствии готовых наборов данных для непосредственного использования в экологических исследованиях. Существуют достаточное количество источников (включая свободные) исходных пространственных данных, например: цифровые модели рельефа [3], мультиспектральные спутниковые снимки [4], климатические данные [5]. Все же, в целях экологического анализа, обычно, применяются не первичные данные, а продукты их обработки.

Для территории Донбасса готовые наборы пространственных данных практически отсутствуют, что усложняет внедрение ГИС технологий в практику экологических исследований.

В связи с вышесказанным была поставлена цель начать разработку стандартизированного набора пространственных данных территории Донбасса, необходимых для экологических исследований. Основные задачи: подготовить карты с базовыми гидрологическими показателями, орографические карты, рассчитать распространенные вегетативные индексы; разместить карты в сети Интернет под разрешительной лицензией;

подготовить подробные метаданные и описания методов получения финальных карт.

Материалы и методы

Все манипуляции проводились в среде операционной системы Ubuntu 16.04. Для подготовки и обработки данных выбраны программные продукты, относящиеся к категории свободного программного обеспечения (в случае выбранных программ – бесплатные для использования и с открытым исходным кодом). Составление матрицы (склейка) отдельных картографических покрытий производилось с применением утилиты `gdal_merge.py`, программного комплекса `GDAL/ORG 2.2.2` [6]. Атмо-сферная коррекция мультиспектральных снимков проекта Sentinel 2 осуществлялась с применением программного продукта `Sen2Cor 02.05.05` [7]. Основная обработка данных проводилась в среде ГИС `GRASS GIS 7.4` [8]. Демонстрационные изображения карт подготовлены с использованием ГИС `QGIS 3.2.2` [9]

В качестве цифровой модели рельефа (ЦМР) использованы данные проекта `ALOS Global Digital Surface Model (AW3D-30)`, Японского Управления Аэрокосмических Исследований. Данная модель имеет пространственное разрешение в 1 угловую секунду (около 30 м на экваторе) и является одной из самых точных среди общедоступных ЦМР. Сравнение с наземными измерениями высот показало, что средняя вертикальная ошибка данных составляет 4,36 м со стандартным отклонением 3,66 м [3]. Исходные данные доступны для бесплатного скачивания по адресу: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>.

Данные предоставляются для скачивания в виде растра с пространственным покрытием $1^\circ \times 1^\circ$. Было скачано 20 квадратов с 46° с.ш до 49° с.ш. и с 36° в.д. до 40° в.д., включительно. Указанные наборы данных предоставляются в двух вариантах передискретизации: по методу среднего арифметического и по методу медианного значения. Для дальнейшей работы использовали первый вариант. Исходная проекция – `EPSG:4326`.

В качестве данных о спектральных характеристиках поверхности использовали мультиспектральные снимки миссии спутников Sentinel-2, Европейского Космического Агентства. Данные доступны для скачивания по адресу: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. Для первично-

го наполнения базы были выбраны снимки, покрывающие территорию Донбасса в середине вегетационного периода с условием минимальной облачности. Выбранная дата съемки – 29.05.2018 г. Данные предоставляются в виде растровых тайлов (элементов разбиения карты на равновеликие прямоугольные участки), размером примерно 100×100 км. Для обозначенной территории было скачано 4 тайла (спутник: S2A, уровень обработки 1C, базис обработки: N0206, номер относительной орбиты R021, номера тайлов: T37TCN, T37TDN, T37UCP, T37UDP).

Полученные спутниковые снимки содержат информацию об отражении на границе атмосферы в 12 спектральных каналах с уже проведенной ортокоррекцией. Проекция – `EPGS:32637`. Названия, соответствующие длины волн и пространственное разрешение спектральных каналов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Названия и характеристики спектральных каналов спутниковых снимков Sentinel 2

Название	Центральная длина волны, (нм)	Разрешение, м	Комментарии
B01	443	60	прибрежные аэрозоли
B02	490	10	видимый синий
B03	560	10	видимый зеленый
B04	665	10	видимый красный
B05	705	20	красный край фотосинтеза
B06	740	20	красный край фотосинтеза
B07	783	20	красный край фотосинтеза
B08	842	10	ближний инфракрасный
B09	940	60	водяной пар
B10	1375	60	дальний инфракрасный (перистые облака)
B11	1610	20	дальний инфракрасный
B12	2190	20	дальний инфракрасный

На основе исходных данных подготовили тематические наборы картографических данных по трем блокам информации: гидрология (аккумуляция поверхностного стока), орография (у-

клоны, экспозиции склонов и геоморфоны) и вегетационные индексы территории (NDVI, AVI, SATVI, REIP1, NDWI, BRI).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе провели атмосферную коррекцию спутниковых снимков Sentinel 2 с помощью Sen2Cor 02.05.05. При этом использовали базовые настройки. В результате получили растры с вышеуказанными каналами в формате отражения у поверхности Земли. Далее, для каждого из каналов объединили 4 тайла в один (утилита `gdal_merge.py`), таким образом получили сплошные растры на всю целевую территорию. Далее по тексту эти объединенные данные будут обозначаться, как спутниковые снимки. Аналогичное объединение было проведено для тайлов цифровой модели рельефа.

Система координат, проекция и пространственные границы полученных спутниковых снимков были выбраны как целевые для всех обрабатываемых данных и целевых карт. Таким образом все результирующие карты приводились к проекции EPSG:32637

Для соответствия этому требованию цифровая модель рельефа была перепроецирована в указанную систему координат (автоматически при импорте в проект GRASS GIS). Для единообразия исходных данных передискретизировали ЦМР до разрешения 10 м с помощью функции `r.resamp.l.interp` с параметром `method=bilinear`, то есть по методу билинейной интерполяции. Кроме того, растровые данные спутниковых снимков с пространственным разрешением 20 м и 60 м передискретизировали до разрешения в 10 м по методу ближайшего соседа.

Вся дальнейшая обработка данных проводилась в среде GRASS GIS, поэтому названия программных модулей будут приводиться без указания названия ГИС.

Гидрологические данные

Доступность влаги является одним из ключевых факторов влияющих на распространение растений. Поэтому карты гидрологического режима территории являются ценным источником информации при экологической оценке местообитаний. Гидрологический режим является суммой большого количества взаимосвязанных процессов прихода и расхода влаги (осадки, испарение, транспирация, поверхностный сток, латераль-

ные и вертикальные перемещения в грунте и так далее). В связи с этим создание гидрологических моделей, претендующих на высокую точность трудноосуществимо на практике, так как требует вовлечения сложных методов обработки и большого количества исходных данных (орография, климат, данные о почвах и растительности).

Упрощенные гидрологические модели не могут обеспечить высокую точность результатов, все же они могут содержать важную информацию, характеризующую конкретные местообитания. В частности, классические модели водоразделов позволяют спрогнозировать направление и относительную величину поверхностного стока в зависимости от морфологии поверхности [10]. Метод основан на моделировании гравитационного перемещения воды по неровной поверхности без учета испарения, инфильтрации или накопления в грунте. Из такой оценки могут быть получены водосборные бассейны, ограниченные локальными водоразделами и ориентировочные русла водотоков. Кроме того, модель позволяет оценить относительную аккумуляцию стока – это значение площади с которой собирается поверхностный сток, протекающий через каждую точку карты. Показатель аккумуляции стока возрастает от возвышенностей к минимальным высотам водозаборного бассейна [11].

В исследованиях Иверсона [12] установлено, что показатель аккумуляции поверхностного стока может коррелировать с индексом влажности почвы и влияет на изменения видового состава леса. Результаты моделей поверхностного стока были эффективно использованы совместно с другими показателями в качестве предикторов при прогнозировании продуктивности лесной экосистемы [13].

В связи с этим было решено включить в целевой набор карту аккумуляции стока. Модель водоразделов строили на основе ЦМР AW3D-30 с использованием модуля `r.watershed` с предварительной коррекцией данных модулем `r.hydrodem`. Чтобы избежать проблем с обработкой, все точки ЦМР с высотой над уровнем моря ниже или равной 0 были удалены (участки соответствующие акватории Азовского моря). Модель строили с параметром `threshold = 106`. В результате получили растровую карту аккумуляции стока. На границах ЦМР присутствовали точки с отрицательными значениями (точки, сток на которые приходится

из-за границ карты). Такие ошибочные точки были удалены. Единицы измерения аккумуляции были приведены к 10 м^2 и округлены до целого. Для удобства хранения карты в формате 16 бит, значения выше 65535 также были удалены. Такие точки составляли менее 0,1% от общей территории и соответствовали центральным водотокам крупных водосборов, поэтому их отсутствие не повлияет значимым образом на информативность карты.

Орографические данные

Морфология поверхности сама по себе оказывает значительное влияние на формирование биocenozов. В исследовании группы Дависа [14] обнаружена достоверная ассоциация типов растительности с показателями крутизны и экспозиции склонов. Те же параметры указываются, как одни из наиболее распространенных предикторов в сфере прогностической картографии растительности [15]. Помимо количественных характеристик рельефа интерес может представлять и качественная классификация морфологических форм. Относительно недавний метод выделения геоморфонов (geomorphons) позволяет алгоритмически отнести участок территории к одной из десяти форм: равнина, пик, хребет, уступ, отрог, склон, воронка, долина, подножье склона и впадина [16]. Подобные качественные карты могут быть использованы как дополнительный источник информации при классификации территории, или описания экотопа.

Основываясь на этом, включили в целевой набор карты крутизны и экспозиции склонов и карту основных геоморфонов.

Основой морфологического анализа служила ЦМР AW3D-30. Так как некоторые участки Азовского моря на ЦМР имели отрицательные высоты, всем точкам со высотой над уровнем моря меньше нуля было присвоено значение 0.

Карты уклонов и экспозиции склонов получали с помощью модуля `r.slope.aspect` без дополнительных настроек.

На карте экспозиций для каждой ячейки растра указано направление склона, на котором она расположена. Направление отсчитывается, начиная с востока и против часовой стрелки в градусах. Участкам местности с ровной поверхностью присваиваются пустые значения.

Использованная ЦМР имеет достаточно высокое разрешение, поэтому полученная карта уклонов выглядит избыточно детализованной. В свя-

зи с этим, помимо исходного результата, была подготовлена сглаженная карта, отображающая доминирующую экспозицию участка. Для этого воспользовались модулем `r.neighbors` с параметрами `method=median` и `size=11`. В данном случае применяется сглаживание медианным фильтром по типу квадратного скользящего окна со стороной 100 м. В результате каждая точка на сглаженной карте отображает медианное значение экспозиции в окрестностях точки. Для удобства сохранения в целочисленном формате с сохранением дробных величин, все значения на исходной и сглаженной картах были умножены на 100 и округлены. Таким образом единицей измерения экспозиции являются $0,01^\circ$.

На карте уклонов значение каждой ячейки растра соответствует углу наклона склона в этой точке относительно горизонтали (в направлении снижения высоты). В таком формате уклоны могут принимать значения от 0° (ровное место) до 90° (отвесный склон) [17].

По аналогии с картами экспозиции значения были умножены на 100 и округлены. Единица измерения – $0,01^\circ$.

Карту геоморфонов получили с помощью модуля `r.geomorphon` с параметрами `flat = 2,5`, `search = 11`. При такой настройке оценка формы рельефа производится для участков диаметром 100 м, точки считаются отличающимися по высоте, если они формируют угол наклона от горизонтали более $2,5^\circ$. На полученной карте каждая ячейка растра имеет целочисленные значения в пределах от 1 до 10, которые обозначают одну из 10 вышеуказанных форм рельефа.

Вегетационные индексы

Функциональные особенности и состояние растений неизбежно отражается в химическом составе его частей. В частности, пигментный состав листьев может изменяться в широких пределах в зависимости, как от видовых отличий, так и от конкретных условий и текущего состояния растения. Различия в пигментном составе, как и особенности морфологии, проявляются в разной способности наземной фитомассы поглощать и отражать солнечный свет в разных участках спектра [18]. Зная функциональную роль отдельных пигментов, и их физические свойства становиться возможным получать информацию об отдельных растениях или растительном покрове путем анализа спектров отражения. Именно это легло в

основу и обеспечило высокую популярность дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в области экологии растений [19].

Для получения информации о состоянии растительности спутниковые снимки подвергаются специальной обработке. Большое распространение получили методы расчета вегетативных индексов – показателей, учитывающих соотношение двух и более спектральных каналов.

В качестве примера можно привести один из наиболее известных и простых для вычисления индексов, нормализованный относительный вегетативный индекс NDVI. Метод основан на учете различий поглощающей способности хлорофилла в красном и инфракрасном участках спектра.

Хлорофилл эффективно поглощает красный свет, но при увеличении длины волны выше 700 нм, поглощающая способность резко падает, а отражающая возрастает.

Поэтому области с высокой концентрацией хлорофилла, а, следовательно, и растительности, будут иметь значительные различия отражающей способности в этих участках спектра [20].

За последние десятилетия для практических нужд было разработано большое количество вегетативных индексов. Некоторые из них являются попытками улучшить базовый NDVI, некоторые нацелены на получение дополнительной информации, например, для оценки водного статуса растений, концентраций ксантофиллов, фикоцианов или выделения мертвой, поврежденной растительности.

Применение вегетативных индексов разнообразно, от простого выделения растительности на картах [21], до специфических задач прогнозирования продуктивности лесов и посевов [22] или мониторинга последствий пожаров и засухи [23]. В последние годы вегетативные индексы используются, как опосредованный предиктор для оценки и прогнозирования размеров и динамики популяций животных [8].

Основываясь на вышесказанном было решено включить в набор карт несколько распространенных вегетативных индексов. Несомненно, наибольшую информативность имеют серии таких карт за разное время.

Все же единовременные наблюдения также могут эффективно использоваться для относительного описания экотопов или для классификации территории.

NDVI (нормализованный относительный индекс растительности). Наиболее распространенный индекс [24]. Рассчитывается по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (1)$$

где NIR = ближнее инфракрасное излучение, Red = красный участок спектра; в наименования каналов Sentinel 2 это каналы B08 и B04, соответственно.

Принимает значения от -1 (полное отсутствие растительности) до 1 (максимальное покрытие здоровыми растениями). Индекс рассчитывали с помощью модуля `r.marcalc` без дополнительных манипуляций с каналами. Для удобства хранения результат умножен на 10000 и округлен до целого.

EVI (улучшенный индекс растительности). Модификация NDVI призванная решить проблему влияния спектров отражения почвы и спектральных искажений атмосферы. Индекс более надежен на участках с низкой плотностью растительности, а также в регионах с загрязненной атмосферой [25]. Помимо красного и инфракрасного учитывает голубой канал. В отличие от NDVI может принимать значения вне диапазона от -1 до 1, участки со здоровой растительностью обычно имеют значения от 0,2 до 0,8. Рассчитывается по формуле:

$$EVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + C_1 \cdot Red - C_2 \cdot Blue) + L}, \quad (2)$$

где NIR = ближнее инфракрасное излучение, Red = красный участок спектра, Blue = голубой участок спектра; в наименования каналов Sentinel 2 это каналы B08, B04 и B02, соответственно; L = 1 – коэффициент нормализации отражения почвы, C₁ = 6 и C₂ = 7,5 коэффициенты воздействия аэрозолей [21, 25]

Для расчета применили модуль `r.marcalc`, все значения каналов предварительно разделили на 10000 (множитель для приведения значений в продуктах Sentinel 2 к единицам коэффициента отражения). Для удобства хранения результаты были умножены на 10000 и округлены. Так как в некоторых случаях с участием перенасыщенных пикселей были получены очень большие значения EVI, на финальной карте диапазон значений ограничен до ±32767, все значения больше или меньше этого диапазона увеличены или уменьшены до его крайних пределов.

SATVI (нормированный по почве общий вегетационный индекс). Как и **EVI** данный индекс содержит коррекцию для нивелирования отражательной способности голой почвы. В отличие от предыдущих двух индексов, **SATVI** чувствителен не только к зеленой биомассе, но учитывает и мертвую растительность, то есть является относительным показателем суммарной массы растительной органики [26]. Для этого задействуются два канала дальнего инфракрасного излучения. Значение индекса возрастает пропорционально растительной биомассе.

Рассчитывается по формуле:

$$SATVI = \frac{SWIR1 - Red}{SWIR1 + Red + L} \cdot (1 + L) - \frac{SWIR2}{2}, \quad (3)$$

где **Red** = красный участок спектра, **SWIR1**, **SWIR2** = каналы дальнего инфракрасного излучения 1 и 2; в наименования каналов Sentinel 2 это каналы B04, B11 и B12, соответственно; **L** = наклон базовой линии почвы, принятый равным 0,5 [21, 23]. Для расчета применили модуль *g.marcalc*, все значения каналов предварительно разделили на 10000. Для удобства хранения результаты были умножены на 10000 и округлены.

REIP1 (индекс перегиба красного края фотосинтеза). Индекс определяющий значение на перегибе функции отражения при переходе от красного спектра (участвующего в фотосинтезе) к инфракрасному спектру (не участвующему в фотосинтезе). **REIP1** проявляет высокую корреляцию с индексом листовой площади (суммарная площадь листьев, приходящаяся на единицу площади почвы) [22]. Кроме того, сравнительное исследование разных индексов показало, что **REIP1** является одним из лучших предикторов суммарной концентрации хлорофилла [19]. Все это делает **REIP1** ценным индексом в исследованиях, где по относительным показателям ДЗЗ нужно устанавливать реальные характеристики растительности через натурную калибровку.

Значения индекса прямо пропорциональны концентрации хлорофилла. Рассчитывается по формуле:

$$REIP1 = 700 + 40 \left[\frac{\frac{Red - \rho_{780nm}}{2} - \rho_{700nm}}{\rho_{740nm} - \rho_{700nm}} \right], \quad (4)$$

где **Red** = красный участок спектра, ρ_{700nm} ,

ρ_{740nm} и ρ_{780nm} = спектральная плотность на длинах волн 700, 740 и 780 нм; в наименования каналов Sentinel 2 это каналы B04, B05, B06 и B07, соответственно.

Расчет проводили с помощью утилиты *g.marcalc*, все значения каналов предварительно разделили на 10000. Для удобства хранения значения округлили до целого. На финальной карте диапазон значений ограничен до ± 32767 , все значения больше или меньше этого диапазона увеличены или уменьшены до его крайних пределов.

NDWI (нормализованный относительный индекс влаги). В отличие от предыдущих индексов, **NDWI** основан на разнице в отражательной способности воды в ближнем и дальнем инфракрасных каналах. Является относительной мерой содержания влаги и может быть использован для динамического мониторинга водного статуса растений [27]. Также удобен для демаркации водных объектов. Принимает значения от -1 до 1, прямо пропорционален содержанию влаги. Рассчитывается по формуле:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}, \quad (5)$$

где **NIR** = ближнее инфракрасное излучение, **SWIR1** = канал дальнего инфракрасного излучения 1; в наименования каналов Sentinel 2 это B08 и B11, соответственно.

Индекс рассчитывали с помощью утилиты *g.marcalc* без дополнительных манипуляций с каналами. На результирующей карте значения умножены на 10000 и округлены до целого.

BRI (индекс сухой растительности). Индекс используется для выявления сухой, отмирающей растительности. Основан на том, что в процессе некротизации растительные ткани накапливают окрашенные продукты окисления фенолов, что сказывается на отражательной способности в зеленом и инфракрасном участках спектра. Индекс может быть использован для выявления участков растительности поврежденной загрязнениями воздуха или в результате солнечных ожогов [18]. Рассчитывается по формуле:

$$BRI = \frac{1}{Green} - \frac{1}{\rho_{700nm}}, \quad (6)$$

где **Green** = зеленый участок спектра, ρ_{700nm} = спектральная плотность на длине вол-

ны 700 нм, NIR = ближнее инфракрасное излучение; в наименования каналов Sentinel 2 это B03, B05 и B08, соответственно.

Расчет проводили с помощью утилиты *g.marscalc*, все значения каналов предварительно разделили на 10000. Для удобства хранения результат умножили на 100 и округлили до целого. На финальной карте диапазон значений ограничен до ± 32767 , все значения больше или меньше этого диапазона увеличены или уменьшены до его крайних пределов.

Общее описание результатов

В таблице 2 приведены названия файлов сохраненных карт их основная мета информация. Область покрытия всех карт представляет собой прямоугольник, заключенный между широтой от $8^{\circ}43'15,29''$ с.ш. до $46^{\circ}51'56,26''$ с.ш. и долготой от $36^{\circ}16'50,31''$ в.д. до $39^{\circ}7'41,01''$ в.д. Проекция EPSG:32637 (система геодезических параметров WGS84, система координат UTM зона 37N). Пространственное разрешение 10 м.

Таблица 2. Перечень файлов карт и их параметры

Файл	параметр	единицы измерения
ALOS_water_accumulation.jp2	Аккумуляция поверхностного стока	10 м ²
ALOS_aspect.tiff	Экспозиция склонов	0,01°
ALOS_aspect_smooth_10.tiff	Экспозиция склонов, сглаженная медианным фильтром	0,01°
ALOS_slope.tiff	Угол наклона склона (уклон)	0,01°
ALOS_geomorfon.tiff	Геоморфон	Категориальные значения от 1 до 10
S2A_2018_05_29_BRI.jp2	Индекс BRI	Единицы BRI × 100
S2A_2018_05_29_EVI.jp2	Индекс EVI	Единицы EVI × 10000
S2A_2018_05_29_NDVI.jp2	Индекс NDVI	Единицы NDVI × 10000
S2A_2018_05_29_NDWI.jp2	Индекс NDWI	Единицы NDWI × 10000
S2A_2018_05_29_REIP1.jp2	Индекс REIP1	Единицы REIP1
S2A_2018_05_29_SATVI.jp2	Индекс SATVI	Единицы SATVI × 10000

Выводы

В результате проведенной работы подготовлены 11 карт 10 распространенных характеристик территории, которые включают показатели аккумуляции поверхностного стока, орографические показатели и распространенные вегетационные индексы.

Карты могут быть использованы для описания экологических условий интересующей территории, для формирования профилей местообитаний по координатам находок организмов, для сравнительного анализа ареалов, для оценки пространственной связности ядер экологической сети и прочее. Кроме того, карты и описания методов их получения могут быть использованы, как методический материал для курсов по тематике ГИС.

Все файлы полученных карт и файлы с метаданными будут размещены в свободном доступе по адресу https://gitlab.com/ivanstrel/dpr_eco_maps.git. Кроме того, будут добавлены подробные описания процессов получения карт, описание исходных данных и листинги консольных команд, необходимых для воспроизведения результатов.

1. Millington A. C., Walsh S. J., Osborne P. E. (Ed.). GIS and remote sensing applications in biogeography and ecology. Springer Science & Business Media, 2013. 626 p.
2. Steiniger S., Hay G.J. Free and open source geographic information tools for landscape ecology // Ecol. Inform. Elsevier B.V., 2009. Vol. 4 (4). P. 183–195.
3. Santillan J.R., Makinano-Santillan M. Vertical accuracy assessment of 30-m resolution Alos, Aster, and SRTM global DEMs over northeastern Mindanao, Philippines // Isprs - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2016. Vol. XLI-B4, N July. P. 149–156.
4. Korhonen L. et al. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index // Remote Sens. Environ. Elsevier Inc., 2017. Vol. 195. P. 259–274.
5. Hijmans R.J. et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2005. Vol. 25(15). P. 1965–1978.
6. GDAL/OGR contributors. {GDAL/OGR} Geospatial Data Abstraction software Library. 2018.
7. Louis J. et al. Sentinel-2 SEN2COR: L2A processor for users // Eur. Sp. Agency, Special Publ. ESA SP. 2016. Vol. SP-740, N August. P. 9–13.

8. *Neteler M.* et al. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS // *Environ. Model. Softw.* 2012. Vol. 31. P. 124–130.
9. *QGIS Development Team* (2018). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
10. *Quinn P.* et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models // *Hydrol. Process.* 1991. Vol. 5(1). P. 59–79.
11. *Metz M., Mitasova H., Harmon R.S.* Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 15(2). P. 667–678.
12. *Iverson L.R.* et al. A GIS-derived integrated moisture index to predict forest composition and productivity of Ohio forests (U.S.A.) // *Landsc. Ecol.* 1997. Vol. 12(5). P. 331–348.
13. *Storck P.* et al. Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak stream flow in the Pacific Northwest // *Hydrol. Process.* 1998. Vol. 12(6). P. 889–904.
14. *Davis F.W., Goetz S.* Modeling vegetation pattern using digital terrain data // *Landsc. Ecol.* 1990. Vol. 4(1). P. 69–80.
15. *Franklin J.* Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients // *Prog. Phys. Geogr.* 1995. Vol. 19(4). P. 474–499.
16. *Jasiewicz J., Stepinski T.F.* Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms // *Geomorphology.* 2013. Vol. 182. P. 147–156.
17. *Jones K.H.* A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM // *Comput. Geosci.* 1998. Vol. 24(4). P. 315–323.
18. *Merzlyak M.N.* et al. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments // *Russ. J. Plant Physiol.* 2003. Vol. 50(5). P. 704–710.
19. *Main R.* et al. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS)*, 2011. Vol. 66(6). P. 751–761.
20. *Xue J., Su B.* Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications // *J. Sensors.* 2017. Vol. 2017. P. 1–17.
21. *Hagen S.C.* et al. Mapping total vegetation cover across western rangelands with moderate-resolution imaging spectroradiometer data // *Rangel. Ecol. Manag.* 2012. Vol. 65(5). P. 456–467.
22. *Herrmann I.* et al. LAI assessment of wheat and potato crops by VEN μ S and Sentinel-2 bands // *Remote Sens. Environ.* 2011. Vol. 115(8). P. 2141–2151.
23. *Pettorelli N.* et al. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology // *Clim. Res.* 2011. Vol. 46(1). P. 15–27.
24. *Villarreal M.L.* et al. Multi-index time series monitoring of drought and fire effects on desert grasslands // *Remote Sens. Environ. Elsevier B.V.*, 2016. Vol. 183. P. 186–197.
25. *Hui Qing Liu, Huete A.* A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995. Vol. 33(2). P. 457–465.
26. *Torbick N.* et al. Monitoring rice agriculture across Myanmar using Time Series Sentinel-1 assisted by Landsat-8 and PALSAR-2 // *Remote Sens.* 2017. Vol. 9(2). P. 119.
27. *Gao B.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sens. Environ.* 1996. Vol. 58(3). P. 257–266.

Поступила в редакцию: 26.07.2018

**THE DIGITAL MAPS PREPARATION FOR SUPPORT
OF ECOLOGICAL RESEARCH IN DONBASS**

Strelnikov I.I., Glukhov A.Z., Nikolaeva A.V., Mudretsova K.V.

Public Institution «Donetsk Botanical Garden»

GIS are a valuable tool for ecological research, still the absence of sufficient number of map data prevents their wide adoption. In order to solve this problem a standardized maps' set for Donetsk coal basin territory with clear description of its preparation was created. The final set incorporated a map of the overland flow accumulation, maps of relief characteristics and maps of widespread vegetation indexes. The maps could be freely downloaded from https://gitlab.com/ivanstrel/dpr_eco_maps.git.

Key words: hydrological maps, orographic map, vegetation indexes