УДК 902/904 https://doi.org/10.24852/2587-6112.2025.2.154.168

МЕТОДОЛОГИЯ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СОХРАННОСТИ И ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАМЯТНИКОВ АРХЕОЛОГИИ И АРХИТЕКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2025 г. А.Л. Фейзулаев

В статье представлена методология удаленного мониторинга состояния сохранности и динамики изменения памятников археологии, а также исторических центров городов и культурных ландшафтов в их многообразии. Подробная пошаговая методология предваряется рассмотрением как сути дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), так и технических характеристик, преимуществ, недостатков и ограничений данных ДЗЗ со ссылкой на их источники, их доступности и пригодности к использованию в рамках предлагаемой методологии, а также имеющегося на рынке программного обеспечения для их обработки. Отдельно в статье освещены типы и виды угроз и вмешательств в границах рассматриваемых объектов, его зон охраны и широкого окружения, которые могут быть зафиксированы в процессе удаленного мониторинга и отражены в аналитическом отчете, позволив таким образом определить на ранней стадии потенциальное негативное воздействие на объект.

Ключевые слова: Мониторинг, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), археология, архитектура, область интереса (ОИ), факторы воздействия, состояние сохранности.

METHODOLOGY FOR REMOTE MONITORING OF PRESERVATION CONDITIONS AND CHANGE DYNAMICS IN ARCHAEOLOGICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE USING EARTH OBSERVATION DATA

A.L. Feyzulayev

The article presents a methodology for remote monitoring of the conservation status and dynamics of changes in archaeological monuments, as well as historic city centers and diverse cultural landscapes. A detailed step-by-step methodology is preceded by an examination of both the essence of Earth remote sensing (ERS) and the technical characteristics, advantages, disadvantages, and limitations of RS data, with reference to their sources, accessibility, and suitability for use within the proposed methodology, as well as the available software for processing such data. Additionally, the article highlights the types and categories of threats and interventions within the boundaries of the studied sites, their protection zones, and broader surroundings that can be detected through remote monitoring and included in an analytical report. This enables early identification of potential negative impacts on the heritage site.

Keywords: Monitoring, Earth remote sensing (ERS), archaeology, architecture, area of interest (AoI), impact factors, preservation conditions.

Введение

Использование технологий дистанционного зондирования для археологических исследований, или, другими словами, «археологическое дистанционное зондирование», является предметом постоянных исследований, многочисленных публикаций и по сути превратилось в отдельную дисциплину.

Важность использования технологий дистанционного зондирования для изучения вновь выявленных памятников, изучения культурных ландшафтов и проведения оценки состояния сохранности не подлежит сомнению. В то же время необходим обмен опытом на международном уровне для обеспечения наращивания потенциала, осведомленности об инструментах, методологиях и передовой практике. Как отметили Тапете и Сигна (Tapete и Cigna, 2016, с. 717), в этой области необходимы стандартизированные методологии обработки данных, впоследствии адаптированные к конкретным потребностям их конечных пользователей.

Дистанционное зондирование часто используется в археологии для дополнения геонаучных методов, включая геофизические

исследования, ГИС, традиционные методологии сбора данных. То, каким образом комбинируются различные методы, часто зависит от имеющегося на местах опыта и доступных технологий.

Преимуществами предлагаемой в рамках статьи методики дистанционного зондирования для мониторинга археологических и архитектурных памятников являются:

Возможность оценки параметров памятника или прочих характеристик без непосредственного контакта с ним;

Устранение рисков при наблюдении за памятником и снижение стоимости полевых исследований;

Возможность регулярного наблюдения и проведения анализа для мониторинга и оценки состояния сохранности;

Возможность адаптации методологии к потребностям и уровню подготовки конечных пользователей.

Актуальность внедрения методологии удаленного мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ)

Предлагаемая методология была разработана под руководством автора группой специалистов в области ГИС и историко-культурного наследия при поддержке Института археологии Университетского колледжа Лондона (UCL) в рамках научно-исследовательского проекта под эгидой ЮНЕСКО, направленного на улучшение управления компонентами серийной транснациональной номинации в Списке всемирного наследия «Шелковый путь: сеть маршрутов Чанъань – Тяньшанского коридора». Номинация объединила в себе 33 памятника вдоль отрезка Шелкового пути длиной в 5 тыс. км на территории современных Казахстана, Кыргызстана и Китая. Вскоре после включения объекта в Список всемирного наследия стала очевидна необходимость в систематическом, упорядоченном мониторинге его компонентов, зачастую расположенных на расстоянии сотен километров от каких-либо населенных пунктов. В условиях их удаленности и труднодоступности, пожалуй, единственным целесообразным подходом для своевременного отслеживания потенциальных угроз состоянию сохранности стало использование данных ДЗЗ на базе программных продуктов ГИС.

Несмотря на то, что проекты в области ДЗЗ, спутниковой фотосъемки были запущены в США и странах Европы еще в начале 1970-х, на сегодняшний день степень внедрения данных технологий в сферу сохранения и управления историко-культурным наследием относительно невысока и предлагаемые подходы зачастую носят экспериментальный характер. Причиной тому, в частности, является отсутствие необходимых компетенций в сфере ГИС. В этой связи одной из задач при разработке методологии стала возможность ее применения специалистами, не обладающими глубокими знаниями и опытом в сфере применения ГИС.

Что касается программного обеспечения, то по ряду причин предпочтение было отдано QGIS (первоначально известной как Quantum GIS) – кроссплатформенной ГИС, состоящей из QGIS Desktop (настольной версии для редактирования, визуализации, анализа и публикации геопространственной информации), а также QGIS Server и QGIS Web Client. Среди бесспорных преимуществ программного комплекса QGIS можно назвать мощный функционал, отсутствие платы за пользование, совместимость с ОС Windows и большинством платформ Unix (включая MacOS), а также поддержку графических форматов и возможность создания баз данных.

Резюмируя, следует отметить, что предлагаемая методология без каких-либо существенных доработок может применяться для любого типа памятников. Основным условием при этом является получение на регулярной основе высококачественных спутниковых или аэрофотоснимков и систематическая фиксация результатов наблюдений для своевременного выявления возможных рисков и угроз.

Описание и обоснование методологии. Вызовы и ограничения

Как было упомянуто выше, выбор методов дистанционного зондирования и их комбинирование зависит от опыта специалистов, использующих данные методы исследования и мониторинга, технических навыков работы с космическими снимками различных типов и соответствующего программного обеспечения (ПО), а также соответствия выбранной методологии поставленным задачам. Кроме того, важное значение имеет доступность

инструментов и технологий для их регулярного использования.

Предлагаемая в рамках данной статьи методология основана на визуальном анализе спутниковой фотосъемки участка земли, включающего собственно памятник, его зоны охраны и широкое окружение, с использованием инструментария, предлагаемого геоинформационной системой QGIS.

Таким образом, методология подразумевает выполнение с определенной периодичностью следующего комплекса мероприятий:

Загрузка и георефернцирование спутниковых фотоснимков в QGIS с учетом необходимых характеристик и параметров. На данном этапе с учетом особенностей объекта и заданной частоты проведения визуального анализа необходимо определиться с источником получения спутниковых фотоснимков. Существует ряд ресурсов с бесплатными базами снимков, доступными для скачивания. Однако одним из наилучших решений будет использование георефернцированных коммерческих снимков высокого разрешения, полученных (на договорной или безвозмездной основе) от организаций, специализирующихся на технологиях ДЗЗ. При этом важно обратить внимание на следующие детали:

Область интереса (особенно в случаях, когда снимки приобретаются у сторонних организаций);

Спектр потенциальных угроз и вмешательств для конкретного памятника;

Пространственное разрешение и прочие технические характеристики снимков.

Метод загрузки данных ДЗЗ с сервисов Google Earth, Bing и т. д. (streaming) является лишь одним из возможных. При хорошем пространственном разрешении снимков частота их обновлений иногда оставляет желать лучшего, особенно для удаленных районов.

Проведение графического анализа с использованием инструментария QGIS.

Документирование. Заполнение аналитического отчета по результатам проведённого анализа. Данный этап необходим для систематического сбора и каталогизации материалов.

Как уже было упомянуто ранее, на сегодняшний день имеется значительное количество ресурсов, предлагающих данные дистанционного зондирования Земли, полученные с помощью ряда космических аппаратов (КА). Из наиболее заметных можно выделить USGS Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) от Геологической службы США (USGS), EOS Landviewer (https://eos.com/lv/), Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu/), Sentinel Hub, NASA Earthdata Search (https://search.earthdata.nasa.gov/) и некоторые другие. Отдельно необходимо отметить деятельность Международного центра космических технологий для культурного и природного наследия (HIST) под эгидой ЮНЕСКО (Китай), являющегося одной из первых международных организаций, работающей в области дистанционного зондирования в применении к объектам историко-культурного наследия.

При выборе ресурса решающее значение имеет разрешающая способность спутниковых фотоснимков и периодичность обновления.

Частота мониторинга устанавливается индивидуально исходя из особенностей того или иного объекта. При принятии решения целесообразно принимать во внимание имеющиеся временные и человеческие ресурсы, периодичность обновления/получения данных спутниковой фотосъемки, а также вероятность возникновения угроз и потенциального причинения ущерба памятнику. Из факторов риска можно выделить близость к населенным пунктам, интенсивность хозяйственного освоения и изменение режима использования территории в широком окружении памятника (например, передача в сельскохозяйственное пользование).

При определении площади для мониторинга (области интереса) необходимо учитывать несколько факторов:

Площадь изучаемого объекта археологии или архитектуры. С учетом того, что речь может идти о поселениях, городищах или исторических центрах городов, площадь области интереса может достигать нескольких гектаров.

Близость населенных пунктов, предприятий и объектов инфраструктуры, представляющих потенциальную угрозу для целостности и аутентичности объекта. Спектр угроз антропогенного характера может включать в себя капитальное строительство, строительство объектов инфраструктуры (дороги, ЛЭП, трубопроводы и проч.), выпас скота, несанкционированный сброс твердых бытовых и прочих видов отходов, вандализм, мародерство, грабительские раскопки и проч.

В значительной степени угрозу представляет близость сельскохозяйственных угодий, орошение которых способно существенно изменить уровень грунтовых вод и содержания химических веществ в почве.

Наличие информации о планировании работ в непосредственной близости от памятника, способных оказать негативное влияние на целостность и аутентичность объекта.

Требуемая детализация. В условиях, когда разрешающая способность спутникового фотоснимка ограничена техническими характеристиками оборудования, установленного на КА, необходимо выдержать разумный баланс между площадью охвата и степенью детализации. Другими словами, увеличение площади охвата приведет к уменьшению степени детализации, и наоборот.

Важно определиться и со списком угроз для памятника, являющегося объектом мониторинга. Нужно понимать, что перечень рисков и угроз может впоследствии дополняться по мере необходимости. Из наиболее вероятных факторов негативного воздействия можно выделить пожары, подтопления, климатические аномалии, сейсмическое, биологическое и антропогенное воздействие, а также загрязнение химическими соединениями.

Необходимо понимать, однако, что удаленный мониторинг с использованием спутниковой фотосъемки является лишь первым этапом диагностики изменений, происходящих на объекте. Давая возможность изучить общий характер изменений техногенного, природного и антропогенного характера, происходящих в границах объекта, его зон охраны и широкого окружения, спутниковая фотосъемка не позволяет адекватно оценить масштаб и характеристики причиненного ущерба. Степень воздействия на памятник таких факторов, как, например, эрозия, повышение уровня грунтовых вод, воздействие солей, грабительские раскопки, необходимо устанавливать и документировать в ходе полевых выездов. Таким образом, удаленный мониторинг должен сочетаться с обследованием памятника в натуре для комплексной и всесторонней оценки причиненного ущерба.

Описание поэтапного алгоритма практического применения предлагаемой методологии на примере археологического комплекса Акыртас (Республика Казахстан)

В основу предлагаемой методологии легла подготовка и структурирование изучаемой области интереса через наложение сетки, которая позволяет разбить поверхность земли на квадраты произвольного размера. Размер ячеек при этом устанавливается исходя из характеристик памятника, разрешающей способности спутникового фотоснимка и общей площади области интереса. Далее методологией предлагается оценка (визуальная или при помощи аналитических инструментов программы QGIS) площади, занимаемой различными типами покрытий в процентах от общей площади ячейки.

В целях практического применения методологии вся последовательность мероприятий была разбита на этапы. Блок-схема ниже раскрывает то, как этапность работ соотносится с общей структурой методологии.

В качестве примера в рамках данной статьи был выбран комплекс Акыртас, относящийся к VIII–XII вв. и расположенный в 40 км к востоку от г. Тараз, Республика Казахстан.

Следует учитывать, что данный алгоритм не является единственно верным вариантом решения задач по удаленному мониторингу, а с учетом большого разнообразия возможностей, предлагаемых QGIS, методология может дорабатываться и адаптироваться.

1 ЭТАП – загрузка спутниковых фотоснимков в QGIS.

В панели **Browser Panel** правым кликом по разделу **XYZ Tiles** необходимо открыть контекстное меню и нажать **New Connection** (Новое подключение). В открывшемся окне впечатать название (отражающее источник, откуда был получен снимок, например снимок из Google Планеты) и вставить URL ссылку.

Примечание 1. Панель Browser Panel можно настроить, нажав правой кнопкой на заголовок панели по левой стороне от рабочего поля QGIS.

Примечание 2. URL ссылки на наиболее популярные картографические сервисы, предоставляющие бесплатные спутниковые снимки, даны ниже:

Open Street Map

http://a.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png

Google

Hybrid

http://mt0.google.com/vt/lyrs=y&hl=en&x={x}&y={y}&z={z}

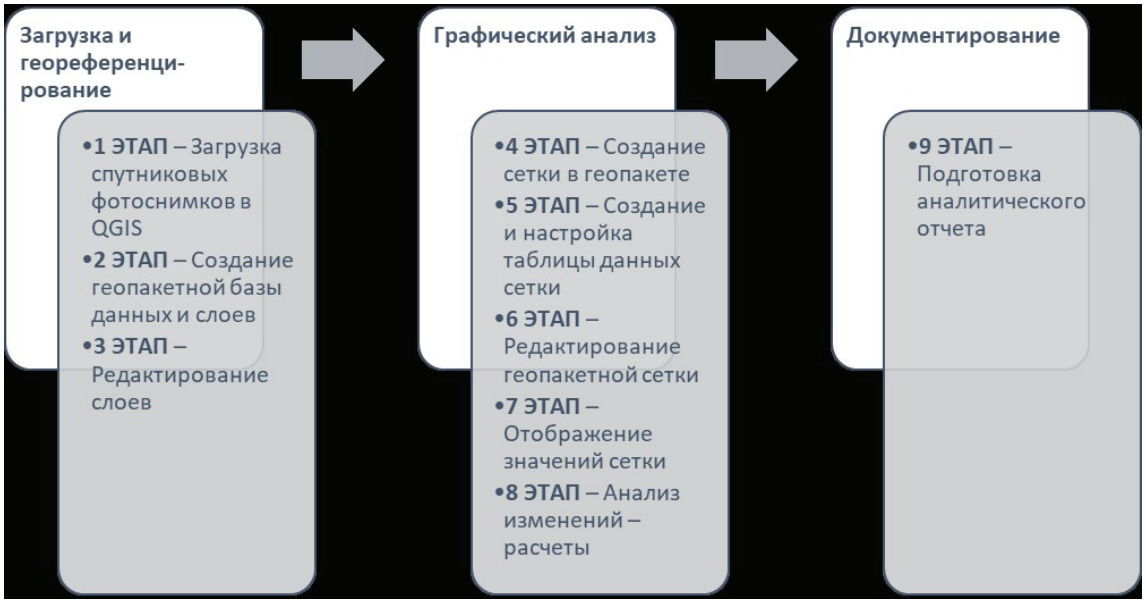

Рис. 1. Блок-схема этапности работ в рамках предлагаемой методологии.
Fig. 1. Flowchart of the work stages within the proposed methodology

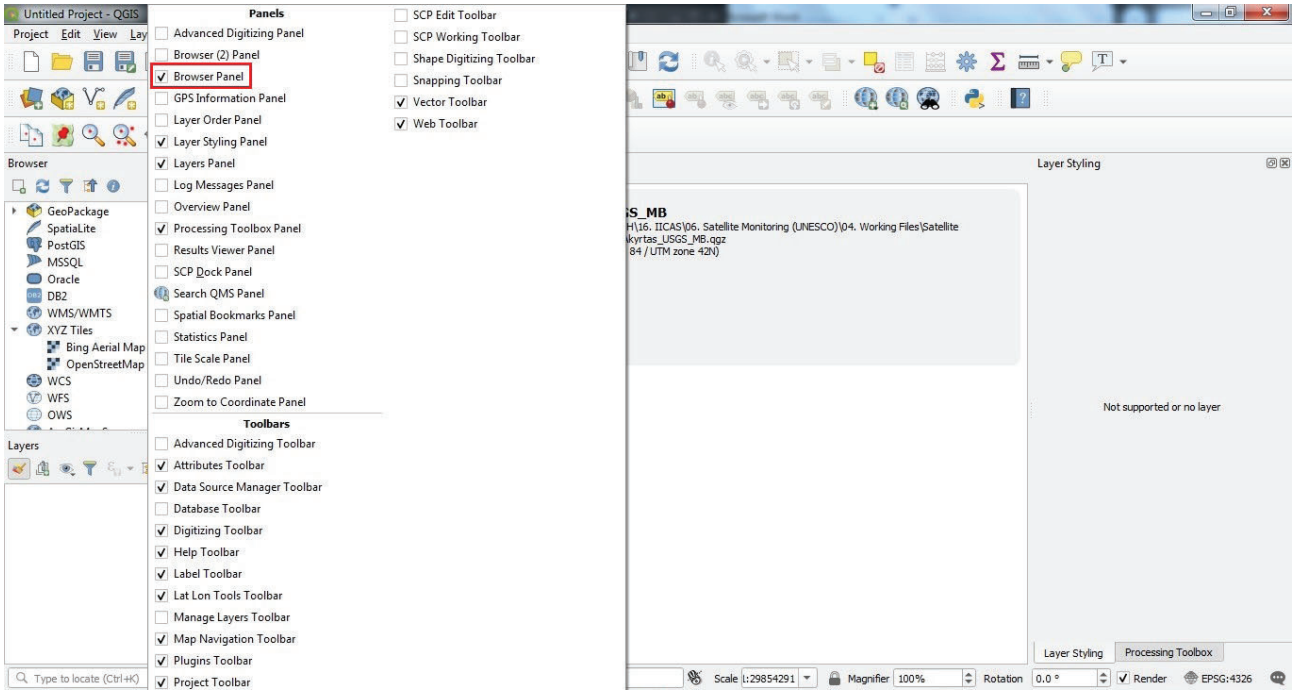

Рис. 2. Этап 1 – загрузка спутниковых фотоснимков в QGIS
Fig. 2. Stage 1 – loading satellite imagery into QGIS

Satellite
http://mt0.google.com/vt/lyrs=s&hl=en&x={x}&y={y}&z={z}
Roads
https://mt1.google.com/vt/lyrs=m&x={x}&y={y}&z={z}
Bing Aerial
http://ecn.t3.tiles.virtualearth.net/tiles/a{q}.jpeg?g=1
ESRI World imagery
https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}

ArcGIS Map Server connector
http://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services

Далее необходимо дважды кликнуть на появившемся в разделе **XYZ Tiles** слое с присвоенным новому подключению названием, таким образом загрузив карту в рабочее

поле QGIS. Одновременно слой появляется ниже в панели **Layers** (Слои). Находим объект и регулируем область интереса масштабированием карты.

2 ЭТАП – создание геопакетной базы данных и слоев.

В панели Browser Panel правым кликом открыть контекстное меню и выбрать **Create New Geopackage** (Создать новый геопакет). В открывшемся окне указать имя и директорию для сохранения геопакета. Данная база данных будет содержать все слои и данные, необходимые для проведения анализа.

Далее в том же окне (**New GeoPackage**) целесообразно обозначить границы как собственно самого объекта, так и его зон охраны (новая таблица с собственным именем), выбрав в выпадающем списке тип геометрии **Polygon** (многоугольник).

Примечание 1. Тип системы координат в данном случае выбран EPSG-32642 – WGS 84 / UTMzone 42N, соответствующий системе координат подгруженной спутниковой съемки. В случае загрузки в QGIS георефернцированных (формат GeoTIFF) коммерческих снимков высокого разрешения систему координат для геопакета следует выбирать в соответствии с параметрами снимка.

Таким образом, в геопакете появляется новый объект – границы объекта / зон охраны. В панели **Layers** (Слои) многоугольник, соответствующий границам объекта/ зоны охраны, отображается как отдельный слой.

3 ЭТАП – редактирование слоев.

Для создания собственно границ объекта / зон охраны необходимо выделить соответствующий слой в панели **Layers** и войти в режим редактирования **Toggle Editing**. При этом курсор меняет форму, это означает, что режим редактирования активен.

После этого необходимо сохранить изменения нажатием кнопки **Save Toggle Editing** (следующая за **Toggle Editing**) и отключить режим редактирования. Свойства полигона доступны из контекстного меню (правый клик на соответствующий слой / **Properties** (Свойства) / **Symbology** (Символика) / **Simple Fill** (Цвет заливки – прозрачная). Там же можно назначить цвет контура полигона и толщину линии.

4 ЭТАП – создание сетки в геопакете.

На данном этапе на рабочее пространство (видимую часть снимка) – в терминологии QGIS **Canvas** (полотно) – накладывается сетка, покрывающая границы объекта, зоны охраны и произвольно определенный участок за ее пределами.

Для этого в меню **Vector** (Вектор) необходимо выбрать **Research Tools** (Инструменты исследования) и далее **Create Grid** (Создать сетку).

В открывшемся окне в графе **Grid Type** (Тип сетки) выбрать **Rectangle (polygon)** (Прямоугольная). В графе **Grid Extent** (Размер сетки) можно выбрать перекрытие сеткой всей видимой области (**Use Canvas Extent**) или же обозначить область самостоятельно (**Select Extent on Canvas**). Далее задается длина и ширина ячеек сетки (в графах **Horizontal spacing** и **Vertical spacing** соответственно) в метрах. Здесь необходимо иметь в виду, что сетка с ячейкой размерами 20×20 метров не является единственно возможным вариантом. Размеры могут меняться в зависимости от общей площади объектов и их зон охраны, разрешения спутниковых фотоснимков и искомого уровня детализации.

Перекрытие ячеек (**Horizontal overlay** и **Vertical overlay**) не требуется и в обеих графах выставляется ноль. Необходимо помнить о необходимости создания всей аналитической геометрии (полигонов, сеток и проч.) в той же системе координат, которая является базовой для спутникового снимка.

Создаваемую сетку необходимо ассоциировать с основным геопакетом, выбрав **Save to Geo Package** в графе **Grid**, найдя и отметив в открывшемся окне соответствующий геопакет. При этом при сохранении сетки геопакет пополняется новым слоем.

После нажатия команды **Run** (Запустить) область полотна перекрывается сеткой с заданными параметрами. При этом сетка появляется в списке слоев, а также в соответствующем разделе в **Browser Panel**.

Параметры сетки, как и в случае с полигоном, которым была обозначена граница объекта, вызываются нажатием правой кнопки на соответствующий слой в панели **Layers** и выбором в контекстном меню **Layer Properties** (Свойства слоя). Для изменения параметров отображения сетки необходимо выбрать **Outline: Simple line** в графе **Symbol layer type**. Выбор данного вида отображения сетки означает, что сетка не имеет заполнения (прозрачная), а сама сетка состоит из линий

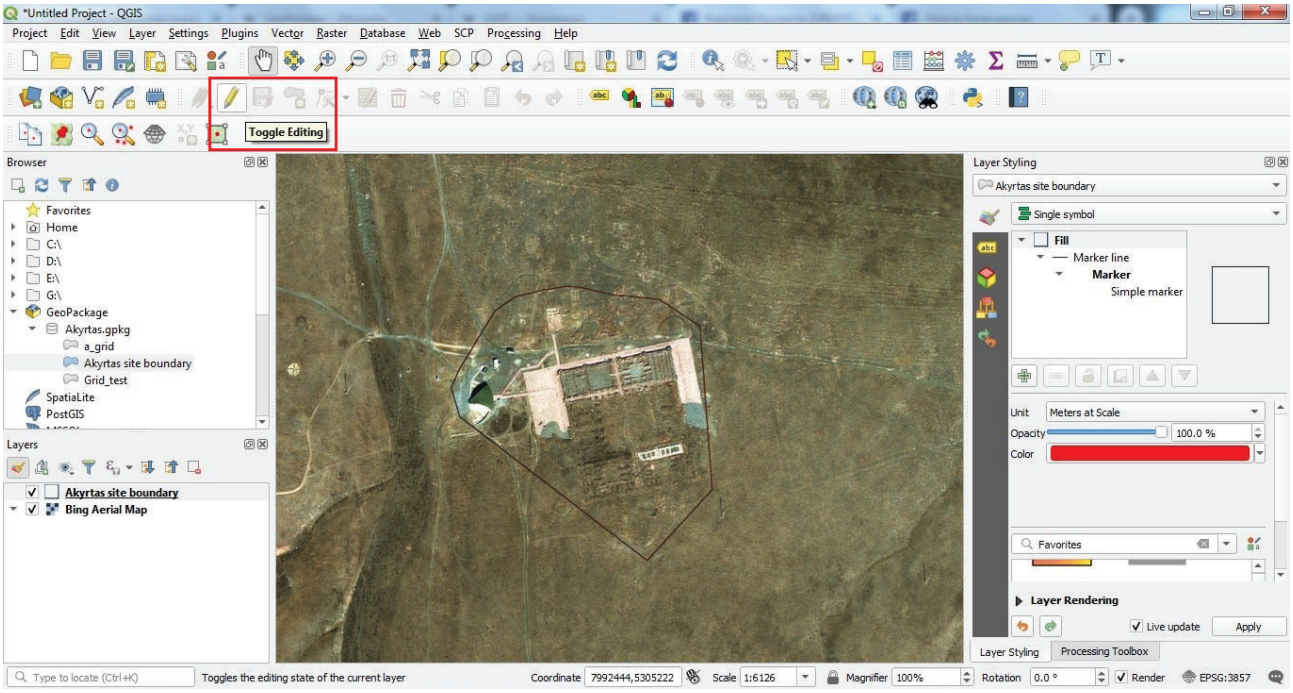

Рис. 3. Этап 2 – редактирование слоев
Fig. 3. Stage 2 – layer editing

черного цвета, толщину которых также можно отрегулировать.

Примечание 1. Звездочка (*) в заголовке окна перед названием файла означает, что некоторые части проекта не сохранены, напоминая о необходимости сохранения всех внесенных в проект изменений.

5 ЭТАП – создание и настройка таблицы данных сетки.

На данном этапе будет настроена связанная с сеткой таблица атрибутов, а именно поля и колонки. Вызвав нажатием правой кнопки слоя, содержащего сетку, контекстное меню, выбираем **Attribute table** (Таблицу атрибутов).

В таблице по умолчанию проставлены идентификационные номера ячеек, а также их параметры.

Для того, чтобы добавить дополнительные поля (соответствующие тем или иным параметрам исследования), необходимо в свойствах слоя перейти в категорию **Source Fields** (Исходные поля) и, воспользовавшись соответствующей кнопкой на панели инструментов, вверху окна включить режим редактирования (**Toggle editing**). Там же находятся кнопки, при помощи которых можно добавить или удалить поля.

Для примера, добавляем поле **Vegetation%** (Процент растительности), в котором для каждой ячейки будет оцениваться процент растительного покрова. Другим примером, рассмотренным в данной методологии, стал **Road%** (Процент дорожного покрытия). После того как все необходимые поля добавлены, режим редактирования закрывается, а внесенные изменения сохраняются.

Перейдя в **Layer Properties** (Свойства слоя) / **Attributes Form** (Формат атрибутов), можно отредактировать то, каким образом будут вводиться данные по соответствующему параметру. Таким образом, кликнув на **Vegetation%**, переходим к **Widget Type** (Тип виджета) и меняем его с **Editable** (Редактируемый) на **Slider** (Ползунок). Логично предположить, что минимальное значение покрытия ячейки растительностью будет равно нулю, а максимальное – ста процентам, значение **Step** (шаг) равно ста (процент может быть выражен любым целым числом от 0 до 100). Далее – **Apply** (Применить), а в выпадающем списке **Style** необходимо выбрать **Save as Default** (Сохранить по умолчанию), что означает, что данные настройки будут автоматически применяться ко всем создаваемым полям таблицы. Далее – сохранить в **Data source Database** (Исходную базу данных).

6 ЭТАП – редактирование геопакетной сетки.

Для редактирования сетки необходимо снова открыть **Attribute Table** (Табли-

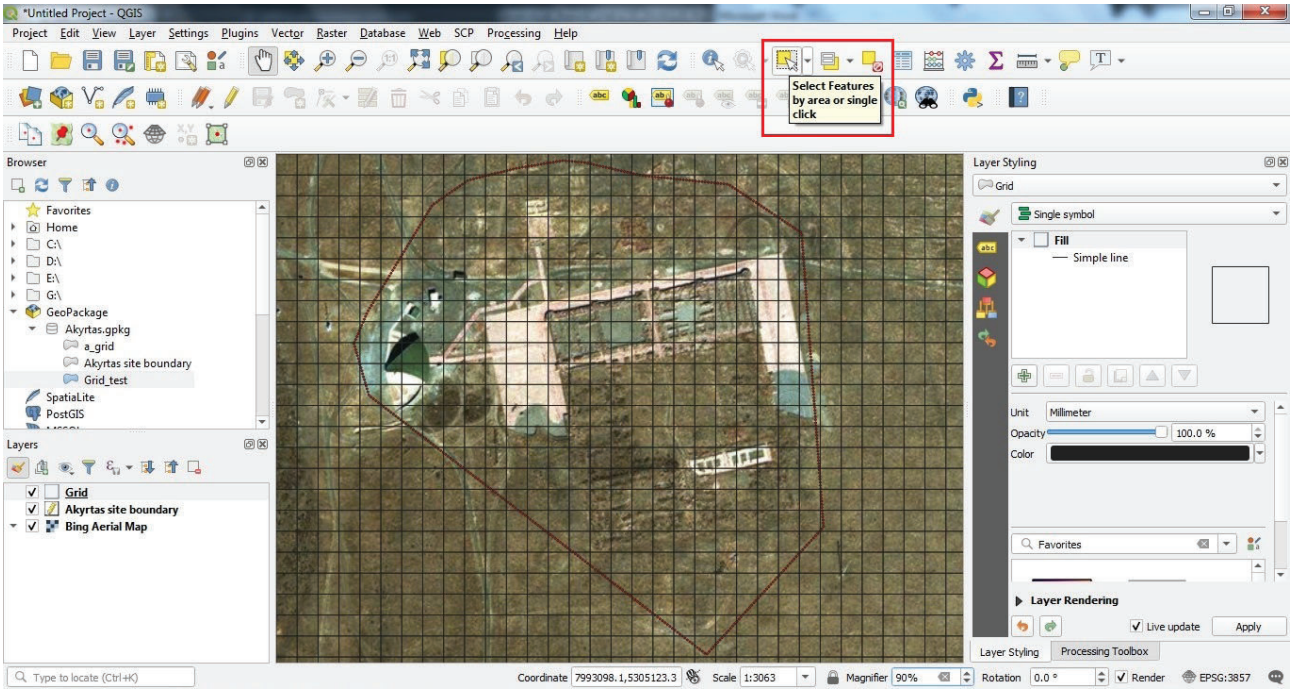

Рис. 4. Этап 6 – редактирование геопакетной сетки
Fig. 4. Stage 6 – editing the geopackage grid

цу атрибутов). В ней кроме полей по умолчанию появились добавленные ранее поля **Vegetation%** и **Road%**. В нижнем правом углу окна таблицы атрибутов есть кнопки, позволяющие переключать режим просмотра таблицы: **Switch to form view** (Переключиться на вид формы) и **Switch to table view** (Переключиться в табличный вид). Вид формы является, вероятно, более наглядным, так как позволяет вводить необходимые данные путем передвижения ползунков, а не непосредственно вводить числа в поле, однако применение того или иного режима просмотра остается на усмотрение пользователей.

Нажимая кнопку **Dock Attribute Table** (Прикрепить таблицу атрибутов) в строке меню мы можем переместить окно вниз, открыв в верхней части доступ к просмотру объекта. Для выбора первого квадрата для проведения визуального анализа необходимо отмасштабировать снимок, приблизив нужный квадрат для более тщательного осмотра. Для выбора данного квадрата нужно включить режим **Select Features by area or single click** (Выбрать параметры по области и одним щелчком).

Включение данного режима позволяет выделить отдельную ячейку (границы ячейки в этом случае будут подсвечены желтым) и ввести необходимые данные. Анализируемый участок земной поверхности виден сквозь границы сетки, благодаря настройкам сетки, выполненным ранее в ходе четвертого этапа. Собственно режим редактирования, как и раньше, включается кнопкой **Toggle editing mode** (Включить режим редактирования) в строке меню в верхнем левом углу таблицы атрибутов. После введения чисел, соответствующих **Vegetation%** и **Road%**, переключившись в табличный вид, можно увидеть выставленные для первой ячейки параметры в таблице атрибутов. Для завершения режима редактирования необходимо сохранить изменения, нажав **Save edits,** и выключить режим редактирования, отжав кнопку **Toggle editing mode**.

7 ЭТАП – отображение значений сетки.

В рамках данного примера процент растительного покрова для каждой ячейки был выставлен случайным образом. В реальности это должны быть данные визуального осмотра и оценки каждой ячейки. Далее на данном этапе будет рассмотрен вариант визуализации введенных в таблицу атрибутов данных.

Для этого правым кликом на слой, содержащий сетку, вызываем контекстное меню и выбираем **Properties** (Свойства). В закладке **Symbology** (Символика) в выпадающем

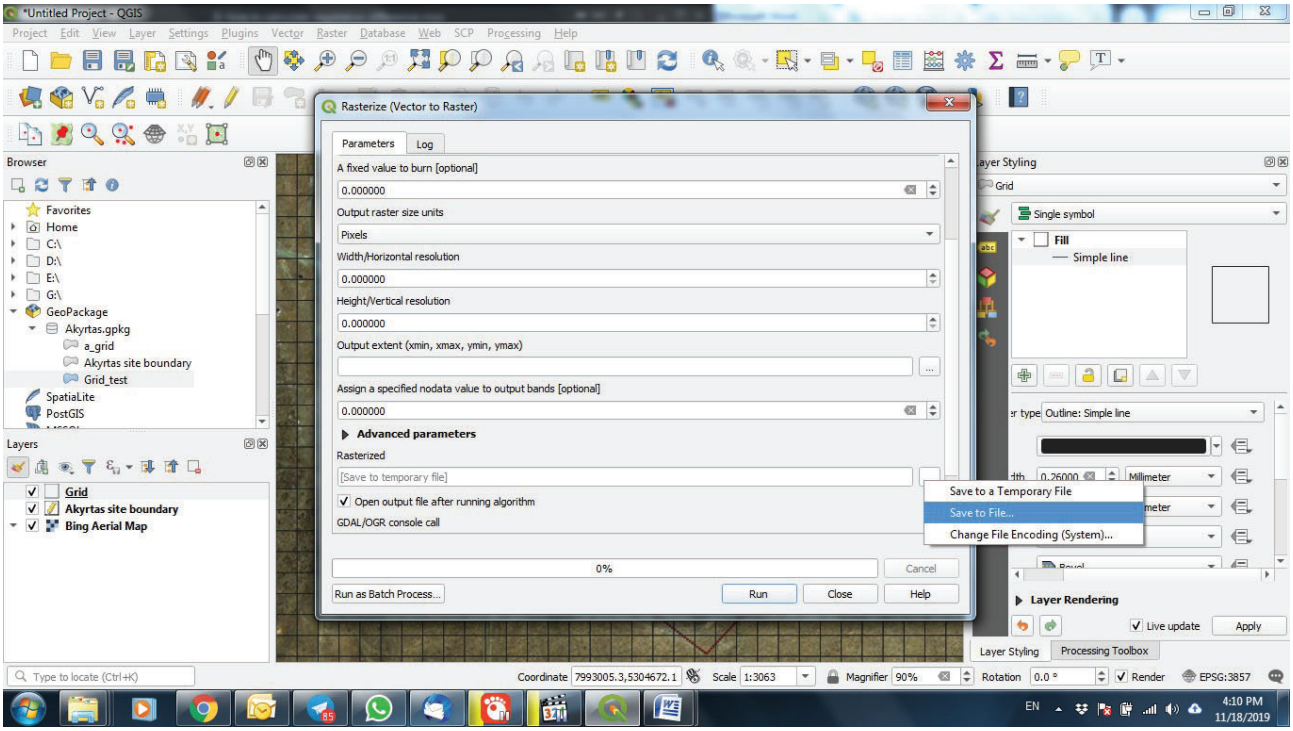

Рис. 5. Этап 8 – анализ изменений и расчеты. Растрирование сеток.
Fig. 5. Stage 8 – analysis of changes and calculations. Grid rasterization.

списке (верхнее поле окна) вместо **Single symbol** (режим с одинаковым типом заливки для каждой ячейки вне зависимости от введенных данных) выбираем **Graduated** (Градуированный). В графе **Column** (Колонка) выбираем анализируемую категорию данных.

Примечание 1. В рамках данного кейса анализировался процент покрытия поверхности земли растительностью. В реальности для каждого объекта число анализируемых параметров должно определяться индивидуально, с учетом текущего состояния сохранности и потенциальных угроз.

В графе **Symbol** (Символ) режим отображения сетки меняем с **Simple line** (Простая линия) на **Simple fill** (Простая заливка). **Color ramp** (Цветовая палитра) при этом может быть любая, но для отображения растительность логично было бы выбрать градацию зеленого.

Кнопкой **Classify** (Классифицировать) можно вызвать текущую градацию цвета по процентам. Таким образом, по умолчанию цветовая шкала будет разбита на 5 классов по 20% (0–20%, 20–40% и т. д.), что будет означать точность (шаг) градации в 20%. Количество классов, однако, может быть изменено в поле **Classes** (Классы) в нижней правой части окна, то есть, для примера, при 10 классах шаг будет равен 10% (10 классов по 10% = 100%). После нажатия кнопки **OK** ячейки сетки будут заполнены цветом в градации, соответствующей процентному содержанию растительности в ячейках, проставленному в таблице атрибутов.

В случае, если есть необходимость настроить прозрачность заливки для того, чтобы спутниковый снимок был частично виден, это можно сделать, перейдя в **Layer properties** (Свойства слоя) сетки и во вкладке **Symbology** (Символика) в разделе **Layer Rendering** (Обработка слоя) выставив желаемый уровень прозрачности.

В панели слоев, раскрыв слой, содержащий сетку, можно увидеть градацию процентов и соответствующих им цветов. Ставя и убирая галочки, можно включать и выключать определенные градации цвета.

8 ЭТАП – анализ изменений – расчеты.

На данном этапе проводится расчетный анализ произошедших за определенный период изменений (в данном случае растительного покрова). Таким образом, при помощи инструментария геоинформационной системы QGIS можно определить динамику произошедших изменений. Как это уже упоминалось ранее, растительность использована в качестве примера, а сама методика может

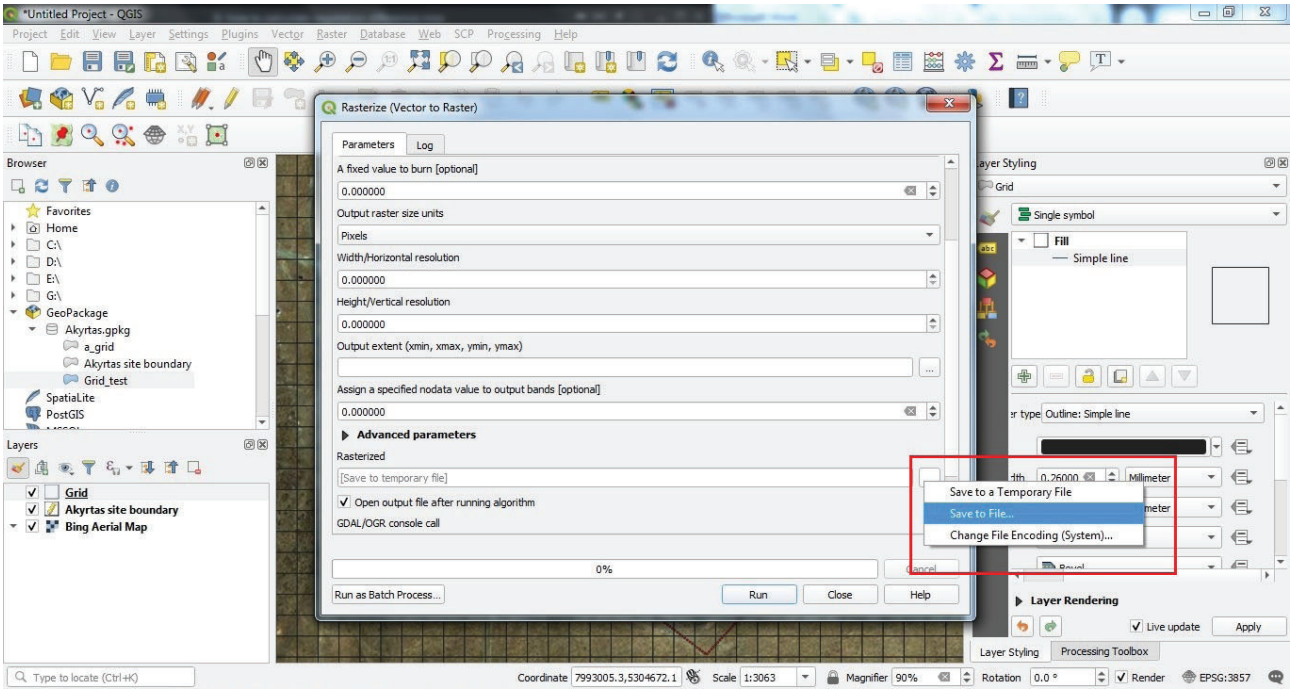

Рис. 6. Этап 8 – анализ изменений и расчеты. Выбор параметров
Fig. 6. Stage 8 – analysis of changes and calculations. Parameter selection

быть применена ко всем категориям угроз и вмешательств, которые можно распознать на спутниковой фотосъемке.

В данном примере на спутниковый снимок была наложена еще одна сетка, аналогичная по параметрам созданной на шестом этапе, но с другими значениями в ячейках. Логика данного метода заключается в переводе сеток из векторного формата в растровый и вычитания одной сетки из другой. Для этого необходимо в меню **Raster** (Растр) в категории **Conversion** (Преобразование) выбрать **Rasterize (Vector to Raster)**.

В открывшемся окне в поле **Input layer** (Вводный слой) необходимо выбрать слой, который будет переводиться в растровый формат, в поле **Field to use for a burn-in value** указать какой именно параметр подлежит обработке (в данном случае **Vegetation%**), уточнить, что слои являются георефернцированными, а единицы измерения – метры (указать размеры ячеек в полях **Width/Horizontal Resolution** и **Height/Vertical Resolution**). В поле **Output Extent** (Размер вывода) указать слой, содержащий сетку. Далее нужно указать директорию для сохранения итогового растрового файла и уточнить его имя, перейдя в раздел **Advanced Parameters** (Расширенные параметры) / **Rasterized** / **Save to file**.

Далее необходимо нажать **Run** (Запуск) и **Close** (Закрыть). Аналогичным образом перевести вторую сетку в растровую графику. Чтобы загрузить в проект полученные растровые изображения, нужно воспользоваться функцией **Open Data Source Manager** (Открыть менеджер источника данных) в строке меню QGIS. В открывшемся окне перейти во вкладку Raster (Растр) и указать директорию, куда были сохранены оба растровых изображения, нажать **Open** (Открыть), далее **Add** (Добавить) и **Close** (Закрыть).

На данном этапе можно провести сравнение двух растрированных сеток или, иначе говоря, вычесть одну из другой, чтобы увидеть разность. Для этого в меню **Raster** (Растр), расположенном в строке меню, выбрать **Raster Calculator** (Растровый калькулятор).

В открывшемся калькуляторе в поле **Raster Bands** (Растровые группы) в верхнем левом углу уже имеются оба растровых изображения. Для получения изображения-разности, необходимо ввести выражение в следующем виде:

([Растровое изображение 1] – [Растровое изображение 2]).

Примечание 1. Для корректной работы необходимо заключить выражение в скобки, а сами растровые изображения вызывают-

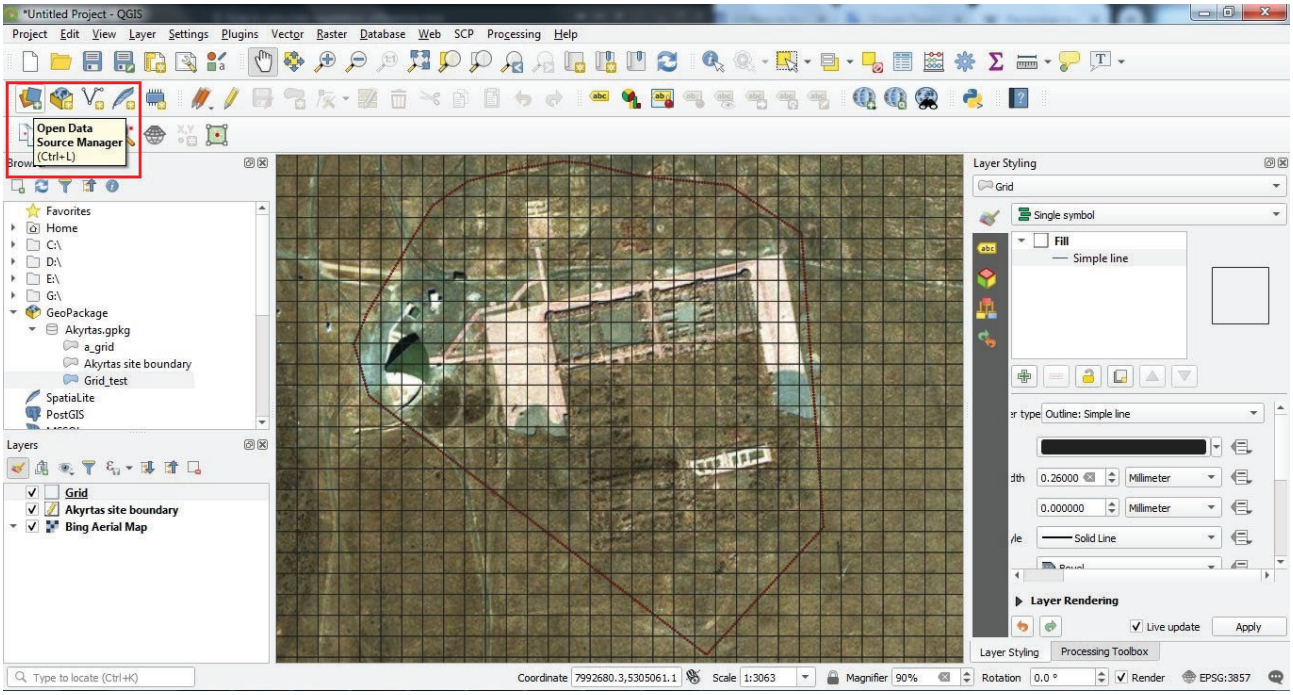

Рис. 7. Этап 8 – анализ изменений и расчеты. Работа с менеджером источника данных.
Fig. 7. Stage 8 – analysis of changes and calculations. Working with the data source manager

ся двойным нажатием в поле **Raster Bands** (Растровые группы).

Полученное изображение следует сохранить, нажав соответствующую кнопку в разделе **Result Layer** (Итоговый слой) окна калькулятора в поле **Output layer** (Выходной слой).

Для того, чтобы получившееся растровое изображение отображалось в более удобном виде, можно в свойствах слоя, содержащего итоговое растровое изображение, сменить тип обработки (**Render Type**) на **Single band Pseudo color**, где цветовой спектр будет варьироваться от красного (потеря растительности) до зеленого (увеличение площади растительности).

Чтобы сфокусироваться на том или ином диапазоне (например, сделать видимыми только те ячейки, где наблюдается уменьшение или увеличение площади растительности), можно, используя растровый калькулятор, выставить значения больше или меньше нуля (используя знаки > или < и необходимое контрольное значение). Итоговое изображение также необходимо сохранить.

9 ЭТАП – подготовка аналитического отчета.

Данные анализа, проведенного с помощью геоинформационной системы QGIS, предлагается отобразить в виде аналитического отчета по приведенной ниже форме. Данная форма заполняется для каждой категории угроз и вмешательств.

Сначала данные проведенного с помощью инструментов QGIS анализа выгружаются в виде растрового файла и на нем отмечаются ячейки или группы ячеек, где изменение того или иного параметра изменятся более чем, скажем, на 20% (к примеру, увеличение пахотных земель вблизи зон охраны объекта). Контрольный процент, однако, может меняться в зависимости от категории/типа угрозы/вмешательства.

Заключение

Технологии ДЗЗ в применении к консервации и управлению объектами историко-культурного наследия, и в частности памятников археологии и архитектуры, и в целом культурных ландшафтов, является предметом исследований в течение последних тридцати лет, а прорыв в улучшении качественных характеристик данных ДЗЗ и методов их обработки позволяет вывести эту сферу на совершенно новый уровень.

Сами же объекты культурного наследия зачастую подвержены значительным рискам, в том числе в результате неконтролируемой урбанизации, строительства объектов

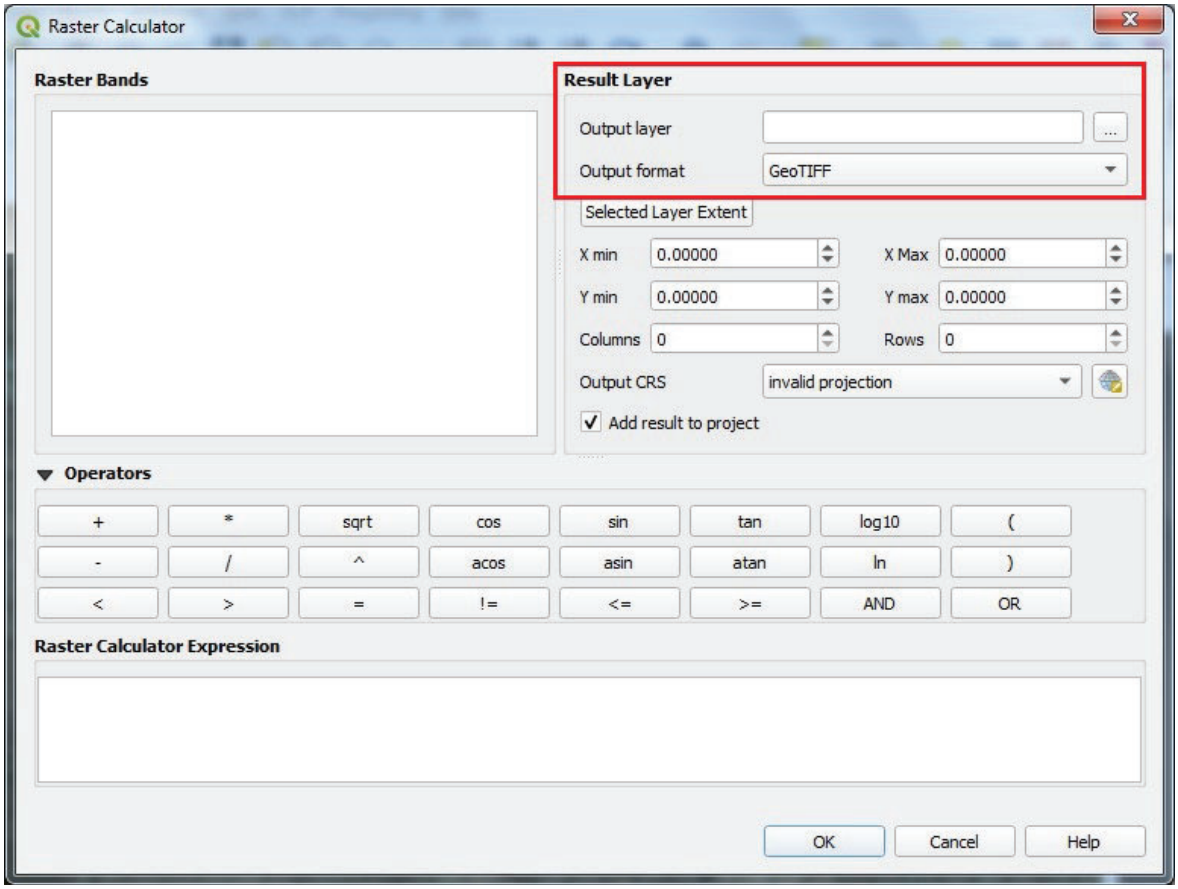

Рис. 8. Этап 8 – анализ изменений и расчеты. Растровый калькулятор
Fig. 8. Stage 8 – analysis of changes and calculations. Raster calculator

инфраструктуры, расширения сельскохозяйственных угодий, влекущих за собой изменения в структуре землепользования, уровне грунтовых вод и химическом составе почв, а также факторов антропогенного и природного воздействия. В связи с этим поэтапное внедрение практик дистанционного мониторинга поможет более оперативно реагировать на возникающие угрозы, по возможности принимая превентивные меры по смягчению негативного воздействия.

Современные технологии получения и обработки данных ДЗЗ предлагают широкий спектр и высокую вариативность методов мониторинга. При выборе методологии необходимо учитывать имеющиеся ресурсы, местный опыт и навыки в работе с данными ДЗЗ, их обработкой и анализом, а также параметры и особенности объектов мониторинга. Предложенная в рамках статьи методология основана на использовании спутниковой фотосъемки и ее визуальном анализе с использованием инструментария программного комплекса QGIS.

В рамках данной статьи был предложен подробный алгоритм, который может быть немедленно применен на практике специалистами, не обладающими специальными навыками работы в ГИС. Этим же объясняется и выбор программного комплекса QGIS, доступного для скачивания и нетребовательного к параметрам персонального компьютера, а также сознательный отказ от дополнительных встраиваемых модулей. Таким образом, все действия в рамках предлагаемых алгоритмов можно выполнить, используя стандартный инструментарий QGIS.

Внедрение предложенной методологии и, как следствие, улучшение навыков работы с системой QGIS откроет новые возможности в использовании данных ДЗЗ. Комбинируя функции и инструменты, а также дорабатывая и развивая методологию, ведомства и специалисты, ответственные за сохранение и управление объектами историко-культурного наследия, смогут лучше адаптировать подходы для соответствия целям и задачам мониторинга.

Таблица 1. Категории угроз и аналитическая записка
Table 1. Threat categories and an analytical note

КАТЕГОРИИ УГРОЗ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА

Категории угроз и вмешательств							
	1	Пожар		6	Загрязнение		
	2	Вода			6.a	Соль	
		2.a	Стоячая вода		6.b	Химические вещества	
		2.b	Текущая вода	7	**Антропогенное воздействие**		
	3	Климат			7.a	Капитальное строительство	
		3.a	Опустынивание		7.b	Стихийное строительство	
		3.b	Выпадение осадков		7.c	Строительство объектов инфраструктуры (дороги, ЛЭП и т.д.)	
	4	Физическое воздействие			7.d	Сельскохозяйственная деятельность (освоение земель, выпас скота и т.д.)	
		4.a	Эрозия		7.e	Стихийные свалки ТБО и прочих видов отходов	
		4.b	Деформация и неравномерная осадка		7.f	Вандализм	
	5	Биологическое воздействие			7.g	Грабительские раскопки	
		5.a	Растительность (представляющая угрозу)		7.h	Прочее	
		5.b	Вредители (в т.ч. дикие животные)		7.i		

Аналитическая записка

Примечания

Исполнитель:

Ф.И.О. Подпись

Должность, организация

Растрированный результат графического анализа (QGIS)

Идентификационный номер ячеек (изменения)

Исполнитель:

Ф.И.О. Подпись

Должность,
организация

ЛИТЕРАТУРА

ИКОМОС. Нарский документ о подлинности (The Nara Document on Authenticity). 1994. URL: https://www.icomos.org/en/charters-and-texts/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/386-the-nara-document-on-authenticity-1994 (дата обращения: 10.12.2024)

ИКОМОС. Сианьская декларация о сохранении окружения построек, достопримечательных мест и районов, являющихся объектами наследия. Сиань, 2005 (Xi'an Declaration On The Conservation Of The Setting Of Heritage Structures, Sites And Areas) URL: https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/xian-declaration.pdf (дата обращения: 10.12.2024)

ИКОМОС. Report on the ICOMOS Advisory Mission to Kazakhstan - The Talgar component (S 01-KZ-01) within the serial World Heritage property Silk Roads: the Routes Network of Chang'an-Tianshan Corridor (China, Kazakhstan, Kyrgyzstan) (Отчет о Консультативной миссии ИКОМОС в Казахстан - компонент Талгар (S 01-KZ-01) в рамках серийного объекта Всемирного наследия «Шелковый путь: сеть маршрутов Чанъань-Тянь-Шаньского коридора» (Китай, Казахстан, Кыргызстан). 2016. (дата обращения: 10.12.2024)

ЮНЕСКО. Конвенция об охране всемирного культурного и природного наследия. 1972. URL: https://whc.unesco.org/en/conventiontext/ (дата обращения: 05.12.2024)

ЮНЕСКО. Решения, принятые на 38-й сессии Комитета всемирного наследия (Доха, 2014) (Decisions of The 38th session of the World Heritage Committee at the Qatar National Convention Centre, Doha). URL: https://whc.unesco.org/en/sessions/38COM/decisions/ (дата обращения: 01.12.2024)

ЮНЕСКО. Решения, принятые на 39-й сессии Комитета всемирного наследия (Бонн, 2015) (Decisions of The 39th session of the World Heritage Committee (Bonn, Germany 28 June - 8 July 2015). URL: https://whc.unesco.org/en/sessions/39COM (дата обращения: 01.12.2024)

ЮНЕСКО. Решения, принятые на 42-й сессии Комитета всемирного наследия (Манама, 2018) (Decisions of The 42nd session of the World Heritage Committee. Manama, Bahrain (as per Decision 12 EXT. COM 3 of the World Heritage Committee, 2017) 24 June to 4 July 2018). URL: https://whc.unesco.org/en/sessions/42COM (дата обращения: 01.12.2024)

ЮНЕСКО. Руководство по выполнению Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия (The Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention). 2021 URL: https://whc.unesco.org/en/guidelines/ (дата обращения: 05.12.2024)

Agapiou, A., & Lysandrou, V. Remote sensing archaeology: Tracking and mapping evolution in European scientific literature from 1999 to 2015 // Journal of Archaeological Science: Reports, 2015, P. 192-200.

Tapete, D. Remote Sensing and Geosciences for Archaeology // Geosciences Journal, 8, 2018, P. 1-10.

Tapete, D., & Cigna, F. Trends and perspectives of space-borne SAR remote sensing for archaeological landscape and cultural heritage applications // Journal of Archaeological Science: Reports, 2016, P. 716-726

Информация об авторах:

Фейзулаев Алим Люманович, архитектор, специалист в области историко-культурного наследия; аспирант, Институт археологии им. А. Х. Халикова АН РТ (г. Казань, Россия); alim.feyzulayev@gmail.com

REFERENCES

ICOMOS. 1994. *The Nara Document on Authenticity*. Available at: https://www.icomos.org/en/charters-and-texts/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/386-the-nara-document-on-authenticity-1994 (accessed: 10.12.2024)

ICOMOS. 2005. Xi'an Declaration On The Conservation Of The Setting Of Heritage Structures, Sites And Areas. Available at: https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/xian-declaration.pdf (accessed: 10.12.2024)

ICOMOS. 2016. *Report on the ICOMOS Advisory Mission to Kazakhstan - The Talgar component (S 01-KZ-01) within the serial World Heritage property Silk Roads: the Routes Network of Chang'an-Tianshan Corridor (China, Kazakhstan, Kyrgyzstan*) (accessed: 10.12.2024) (in English).

UNESCO. 1972. *The General Conference of UNESCO adopted on 16 November 1972 the Recommendation concerning the Protection at National Level, of the Cultural and Natural Heritage*. Available at: https://whc.unesco.org/en/conventiontext/ (accessed: 05.12.2024).

UNESCO. 2014. *Decisions of The 38th session of the World Heritage Committee at the Qatar National Convention Centre, Doha.* Available at: https://whc.unesco.org/en/sessions/38COM/decisions/ (accessed: 01.12.2024) (in English).

UNESCO. 2015. *Decisions of The 39th session of the World Heritage Committee (Bonn, Germany 28 June - 8 July 2015)*. Available at: https://whc.unesco.org/en/sessions/39COM (accessed: 01.12.2024) (in English).

UNESCO. 2018. *Decisions of The 42nd session of the World Heritage Committee. Manama, Bahrain (as per Decision 12 EXT.COM 3 of the World Heritage Committee, 2017) 24 June to 4 July 2018*. Available at: https://whc.unesco.org/en/sessions/42COM (accessed: 01.12.2024) (in English).

UNESCO. 2021. The Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention Available at: https://whc.unesco.org/en/guidelines/ (accessed: 05.12.2024).

Agapiou, A., & Lysandrou, V. 2015. In *Journal of Archaeological Science*: Reports, 192–200.

Tapete, D. 2018. In *Geosciences Journal*. 8, 1–10.

Tapete, D., & Cigna, F. 2016. In *Journal of Archaeological Science*: Reports, 716–726.

About the Author:

Feyzulayev Alim L., Institute of Archaeology named after A. Kh. Khalikov, Tatarstan Academy of Sciences. Butlerov Str., 30, Kazan, 420012, the Republic of Tatarstan, Russian Federation; alim.feyzulayev@gmail.com

Статья поступила в журнал 01.02.2025 г.
Статья принята к публикации 01.04.2025 г.