

Е.А. Паниди<sup>1</sup>, И.С. Рыкин<sup>2</sup>

**О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИНТЕГРАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ИНФРАСТРУКТУР  
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ НАСТОЛЬНЫХ  
ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
НА ПРИМЕРЕ GOOGLE EARTH ENGINE И QGIS**

**АННОТАЦИЯ**

В статье кратко описаны содержание и результаты экспериментов, проведённых с целью проверки возможности и эффективности интеграции и совместного использования публичной облачной геопространственной платформы Google Earth Engine и настольной геоинформационной системы QGIS. Эксперименты были направлены на тестирование возможностей выгрузки и визуализации данных Google Earth Engine с использованием графического пользовательского интерфейса QGIS вместо стандартного способа, предполагающего визуализацию в веб-браузере. Цель экспериментов заключалась в формализации принципов построения специализированного модуля QGIS, проектируемого авторами. Модуль задуман как инструмент для картографирования и анализа временных рядов вегетационных индексов в целях оценки параметров вегетационных сезонов (в частности дат смены, продолжительности и др.) с временным разрешением в 1 сутки.

Контекст проекта составлен продолжительным исследованием авторов, посвящённым изучению взаимосвязей в динамике и изменении климатических параметров и параметров растительного покрова. В ранее выполненных исследованиях авторы выявили, что анализ количественных параметров климата в северных регионах необходимо проводить отдельно для весеннего, летнего и осеннего вегетационных сезонов, т.к. они характеризуются значительными различиями в условиях вегетации растений. Однако из-за разреженности наземной гидрометеорологической сети в северных регионах России (которые являются территорией исследования) вопрос детальной оценки пространственного распределения и дифференциации дат смены и других параметров сезонов становится практически неразрешимым. Картографирование и анализ вегетационных индексов могут быть применены при решении этой задачи, но в случае 1-суточного временного разрешения исходных спутниковых снимков, используемых для расчёта вегетационных индексов, в связи с огромным объёмом обрабатываемых данных необходимо привлечение технологий облачных вычислений. В данном контексте авторы затрагивают вопрос интеграции вычислительных возможностей облачной платформы с разнообразием инструментов анализа настольных ГИС.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Google Earth Engine, QGIS, обработка данных дистанционного зондирования

---

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Кафедра картографии и геоинформатики, 10-я линия Васильевского острова, д. 31–33, 199178, Санкт-Петербург, Россия;  
*e-mail:* panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Кафедра картографии и геоинформатики, 10-я линия Васильевского острова, д. 31–33, 199178, Санкт-Петербург, Россия;  
*e-mail:* ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru

**Evgeny A. Panidi<sup>1</sup>, Ivan S. Rykin<sup>2</sup>**

**TOWARD THE CAPABILITIES OF INTEGRATION  
OF THE CLOUD-BASED SPATIAL DATA INFRASTRUCTURES  
AND UNIVERSAL DESKTOP GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS,  
CASE STUDY OF GOOGLE EARTH ENGINE AND QGIS**

**ABSTRACT**

The paper describes briefly content and results of experiments produced to test possibilities and effectiveness of integration and common use of the Google Earth Engine public cloud geospatial computing platform and QGIS desktop geographic information system. The experiments were focused on probation of Google Earth Engine data unloading and visualizing using QGIS graphical user interface instead of standard Web-browser-based visualizing. Final goal of the experiments was to formalize the principles of architecture of the specialized QGIS module developed by authors. The module is planned as a tool for vegetation index time-series mapping and analysis aimed on estimation of the growing season parameters (i.e., time frames, length, etc.) with 1-day time resolution.

The project context is formed by long-going research collaboration devoted to the investigation of interdependencies in dynamics and change of climate parameters and parameters of vegetation cover. In earlier studies, authors detected that analysis of quantitative parameters of the changing climate in northern regions have to be conducted for spring, summer and autumn growing seasons separately, as these periods are characterized by significant differences in plant vegetating conditions. However, due to the sparseness of ground observation network in northern regions of Russia (which are discovered as the area of interest by the authors), the issue of detailed estimation of the spatial distribution and differentiation of growing season framing dates and other parameters becomes almost unresolvable. Vegetation indexes mapping and analysis can be applied to solve this problem, but implementation of cloud computing facilities is needed in the case of 1-day time resolution of initial satellite imagery used to compute vegetation indexes, due to the huge size of processed data. In such a context authors touch the issue of integration of the cloud platform computational power with the desktop GIS analysis diversity.

**KEYWORDS:** Google Earth Engine, QGIS, remote sensing data processing

**ВВЕДЕНИЕ**

Исследование глобальных изменений природной среды и, в частности, изменений климата и растительного покрова предполагает в т.ч. анализ ретроспективных данных, собранных как с использованием наземных наблюдательных сетей, так и материалов дистанционных (спутниковых) съёмок последних 30–40 лет. Настоящая статья подготовлена в рамках работы авторов по изучению возможностей комплексного применения данных дистанционных съёмок совместно с данными наземного мониторинга, для выявления и наблюдения динамики и изменений параметров климата и растительного покрова [Tsepelev *et al.*, 2015].

Исследования, выполненные ранее как авторами настоящей статьи, так и другими авторами [Stow *et al.*, 2004; Goetz *et al.*, 2007; Jia *et al.*, 2009], продемонстрировали

---

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 10<sup>th</sup> line of Vasilevsky island, 31–33, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail*: [panidi@ya.ru](mailto:panidi@ya.ru), [e.panidi@spbu.ru](mailto:e.panidi@spbu.ru)

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 10<sup>th</sup> line of Vasilevsky island, 31–33, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail*: [ivan.rykin94@gmail.com](mailto:ivan.rykin94@gmail.com), [st059068@student.spbu.ru](mailto:st059068@student.spbu.ru)

целесообразность изучения изменений, происходящих в системе климат-растительность в комплексе, имея в виду, что анализ изменений, выявленных в одной из составляющих системы, в ряде случаев позволяет подтвердить либо уточнить параметры изменений, произошедших в другой составляющей. Часть выполненных ранее работ была посвящена рассмотрению возможностей применения вегетационных индексов, рассчитываемых по материалам спутниковых съёмок для отслеживания динамики растительного покрова и опосредованной оценки динамики параметров климата. В частности, авторами были выполнены работы по изучению возможностей применения нормализованного разностного водного индекса (Normalized Differential Water Index — NDWI) [Gao, 1996] для оценки продолжительности и граничных дат вегетационных сезонов [Panidi, Tsepelev, 2017] по результатам анализа графиков годового хода индекса. Выводы, полученные авторами, а также некоторые результаты, полученные другими исследователями [Медведева и др., 2008; Семёнова, 2015; Миклашевич, Барталёв, 2016; Delbart et al., 2005; Sekhon et al., 2010] позволили судить о возможности применения вегетационных индексов и, в частности, NDWI, для мониторинга параметров вегетационных сезонов. Одним из ранее сформулированных выводов стало утверждение о том, что применение вегетационных индексов позволяет выявить региональную дифференциацию характеристик вегетационных сезонов в северных регионах России, в то время как наземная наблюдательная сеть в этих регионах крайне разрежена, что затрудняет решение данной проблемы.

Последние из ранее выполненных авторами работ включили поисковые исследования в направлении автоматизации вычислительных процессов, выполняемых при обработке данных спутниковых съёмок, построении рядов данных NDWI (в форме карт и графиков) и оценке параметров вегетационных сезонов, а также в направлении повышения временного разрешения используемых рядов данных [Rykin et al., 2019]. В более ранних исследованиях авторами использованы данные спутниковой съёмки MODIS, представленные в форме восьмидневных композитов (продукт MOD09A1 [Vermote, 2015]). В настоящее время исследование выполняется на основе рядов данных с временным разрешением в одни сутки (продукт MOD09GA [Vermote, Wolfe, 2015]).

Переход к использованию данных с более высоким временным разрешением повлёк необходимость отказа от обработки традиционным способом (на настольном компьютере) и привёл к необходимости использования облачных ресурсов хранения и обработки данных дистанционного зондирования. Данная необходимость обусловлена существенным объёмом данных. Продукт MOD09GA распространяется в синусоидальной картографической проекции с пространственным разрешением ~500 м/пикс; при этом глобальное покрытие (растровая сетка, покрывающая всю земную поверхность) разрезана на тайлы (фрагменты) размером 2400 на 2400 пикс (т.е. 1200 на 1200 км в координатном пространстве синусоидальной проекции). Таким образом, объём данных, составляющих временной ряд с 2000 г. по настоящее время (максимальный доступный период), которые необходимо загрузить и обработать, составляет около 500 Гб, в случае если исследуемая территория находится в пределах одного тайла, и возрастает кратно, если территория пересекает границы двух и более тайлов.

В настоящем исследовании используется публичная облачная платформа Google Earth Engine<sup>1</sup> (GEE). Хранение данных «в облаке», на серверной стороне, позволяет существенно повысить скорость и эффективность вычислений, исключая необходимость загрузки полного набора исходных данных на клиентский компьютер, в то время как значительная часть загружаемых данных не используется в вычислениях (каналы

<sup>1</sup> <https://earthengine.google.com>

спутниковой съёмки, неиспользуемые при вычислении NDWI и данные съёмки, находящиеся за пределами области, для которой выполняются расчёты).

Вместе с тем, экспериментальные работы по использованию платформы GEE в вычислениях продемонстрировали, что стандартный (рекомендуемый разработчиками) порядок работы с платформой, подразумевающий проведение обработки данных и вычислений путём написания соответствующего программного кода в онлайн-редакторе, непосредственно на веб-сайте платформы, недостаточно гибок. При таком режиме обработки данных отладка вычислительного кода оказывается затруднительной, в ряде случаев вычисления производятся по принципу «чёрного ящика», когда невозможно уверенно судить о том, как они выполнены; например, как произведено осреднение данных в некоторой окрестности. Кроме того, в этой ситуации набор аналитических инструментов, в частности, готовых вычислительных функций и алгоритмов, и инструментов визуализации данных оказывается существенно более узким, чем в случае работы в универсальных настольных ГИС, таких как QGIS<sup>1</sup> и ArcGIS<sup>2</sup>.

В связи с выявлением указанных проблем, в состав экспериментальных работ включено исследование возможностей совместного применения облачных вычислений и хранения и обработки данных на стороне клиента в универсальных настольных ГИС, которому и посвящена данная статья. Подобный подход к управлению данными, когда хранение и обработка, в зависимости от контекста могут выполняться как на стороне сервера («в облаке»), так и на стороне клиента, принято называть туманными вычислениями (*от англ. Fog Computing*). Данный подход, по мнению авторов, имеет существенный потенциал в области управления пространственными данными [Panidi, 2017].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время GEE является не единственной, но одной из самых известных, востребованных и эффективных [Warren *et al.*, 2015; Yalew *et al.*, 2016; Agapiou, 2017; Vos *et al.*, 2019] облачных платформ, обеспечивающих доступ к архивам свободно распространяемых данных дистанционного зондирования, таких как данные MODIS, Landsat, Sentinel и др., и реализующих возможности проведения вычислений и анализа на основе хранимых на платформе больших пространственных данных.

GEE включает несколько основных составляющих [Gorelick *et al.*, 2017]:

- 1) общедоступный архив пространственных данных (каталог данных), состоящий преимущественно из материалов спутниковых съёмок и продуктов их обработки;
- 2) вычислительные мощности, обеспечивающие извлечение данных из общего архива и выполнение расчётных и иных операций над ними непосредственно в облачной инфраструктуре;
- 3) интерфейс прикладного программирования (*от англ. Application Programming Interface — API*) — базовые программные библиотеки для языков программирования JavaScript и Python, содержащие набор функций, позволяющих выполнять программные запросы к облачной инфраструктуре на извлечение данных и операции над ними;
- 4) интегрированную среду разработки (*от англ. Integrated Development Environment — IDE*), реализованную в форме интерактивного онлайн-редактора программного кода<sup>3</sup> и обеспечивающую использование API для языка JavaScript.

В то время как работа с GEE API для языка JavaScript реализована непосредственно на веб-сайте GEE в интерфейсе браузера, работа с GEE API для языка Python предполагает

<sup>1</sup> <https://qgis.org>

<sup>2</sup> <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>

<sup>3</sup> <https://code.earthengine.google.com>

развёртывание соответствующей библиотеки на компьютере пользователя или на виртуальной вычислительной машине. Таким образом, если в первом случае пользователь (аналитик) должен использовать графический интерфейс браузера, то во втором взаимодействие с платформой может быть реализовано в любом графическом пользовательском интерфейсе, обеспечивающем запуск программного кода Python. В качестве такого интерфейса может выступать настольная среда разработки, использующая Python, специально созданное приложение либо универсальная настольная ГИС, использующая Python в качестве средства создания расширений. В настоящем исследовании использован последний из упомянутых подходов; экспериментальные работы выполнялись на примере QGIS.

Кроме того, при выполнении экспериментов был использован модуль Google Earth Engine для QGIS<sup>1</sup> (GEE для QGIS), разрабатываемый с 2017 г.<sup>2</sup> и размещённый в официальном репозитории модулей QGIS в декабре 2019 г.<sup>3</sup> (рис. 1).

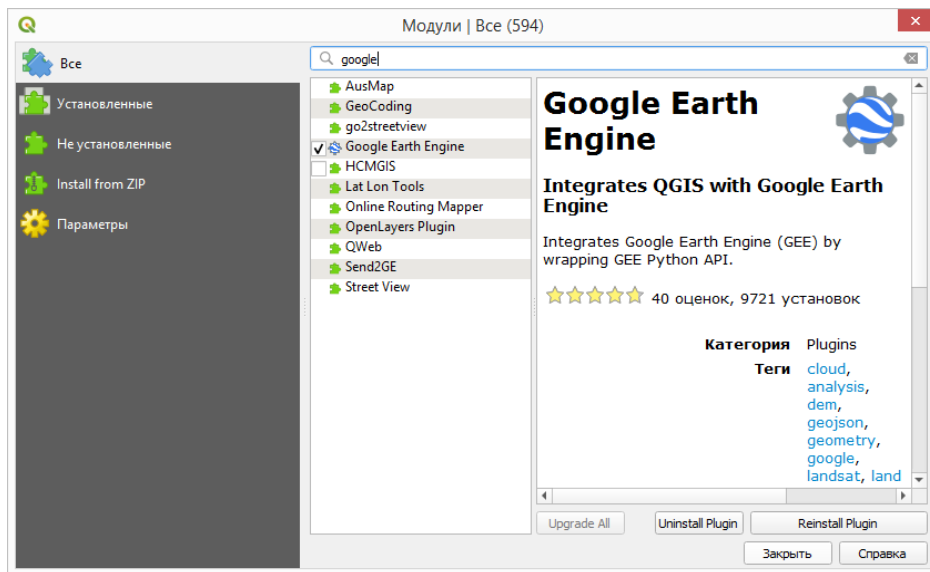


Рис. 1. Интерфейс установщика модулей QGIS; установка из официального репозитория  
Fig. 1. QGIS plugin installer; installing from official repository

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При выполнении экспериментальных работ цель работ была сформулирована следующим образом: формализовать технологические принципы, которые в дальнейшем смогут быть реализованы в форме программных средств и методики управления данными GEE в QGIS (с использованием графического пользовательского интерфейса QGIS).

Первоначально задача эксперимента, с учётом контекста проекта, была сведена к прототипированию программного кода авторского модуля для QGIS и тестированию ряда базовых процедур на основе данных GEE, таких как:

- запрос в пределах заданного пользователем полигона и отображение в QGIS отдельных растровых слоёв (спутниковых снимков или производных продуктов);

<sup>1</sup> <https://gee-community.github.io/qgis-earthengine-plugin/>

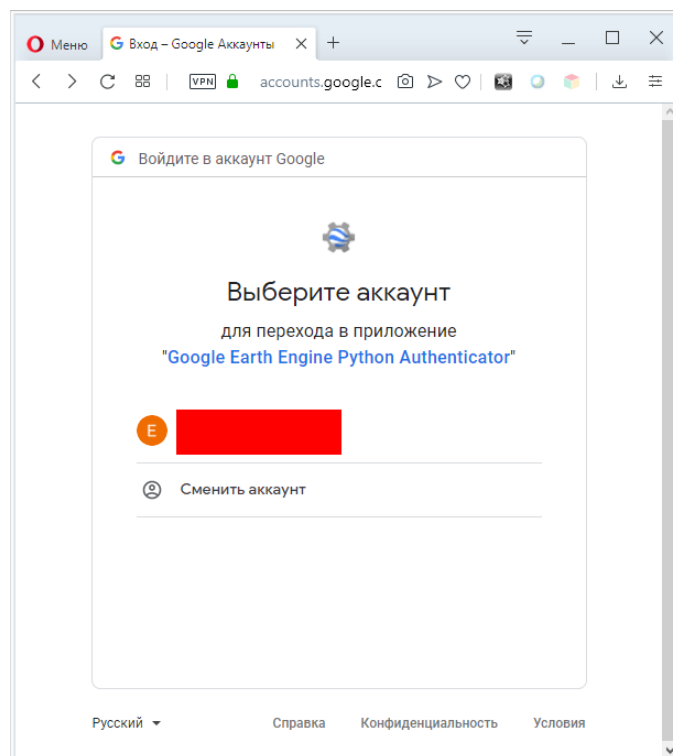
<sup>2</sup> <https://github.com/gee-community/qgis-earthengine-plugin/graphs/code-frequency>

<sup>3</sup> <https://github.com/gee-community/qgis-earthengine-plugin/releases>

- выгрузка данных слоёв с сохранением на клиентском компьютере в форме наборов научных данных (*от англ. Scientific Dataset*), т.е. пригодных для выполнения автоматизированных вычислений;
- выполнение вычислений (решение задач растровой алгебры) с использованием снимков в облачной инфраструктуре с выгрузкой результатов вычислений на клиентский компьютер, аналогично в форме научных данных.

GEE API для Python, обладая функциональностью в целом эквивалентной GEE API для JavaScript, в настоящее время тем не менее не поддерживает картографическую визуализацию данных. В целях ускорения прототипирования был использован модуль Google Earth Engine для QGIS, размещённый, как указано выше, в официальном репозитории QGIS и доступный для версии 3.8 и более поздних.

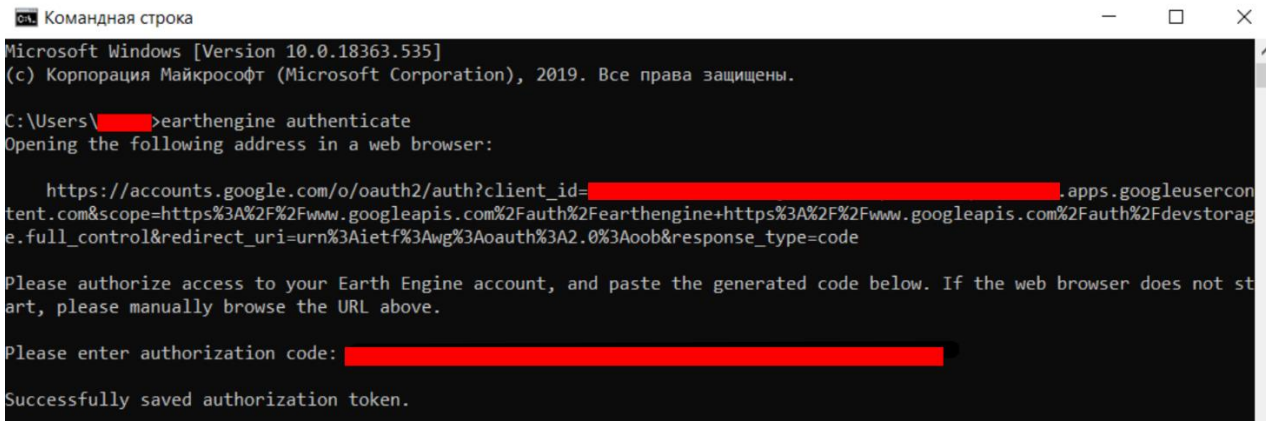
Данный модуль решает проблему сопряжения библиотеки GEE API для Python и графической оболочки QGIS, обеспечивая корректную интерпретацию данных, загружаемых из GEE в QGIS. Модуль реализует отображение в интерфейсе QGIS растровых и векторных данных, получаемых с серверов GEE и управление параметрами их отображения в окне QGIS, вместе с тем иные функции извлечения данных в настоящее время не поддерживаются. При этом путём написания дополнительного программного кода в консоли Python непосредственно в окне QGIS, задействуя GEE API для Python, возможно выполнять операции обработки и преобразования данных на стороне сервера с последующим отображением в QGIS результата обработки (извлечение отдельных каналов, операции растровой алгебры над каналами и т.д.).



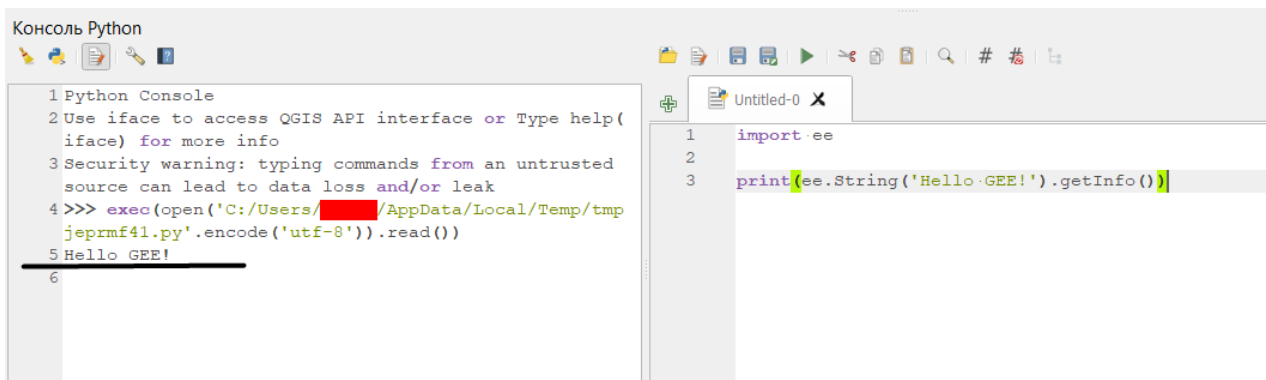
*Рис. 2. Установка модуля Google Earth Engine для QGIS с использованием интерфейса браузера*  
*Fig. 2. Google Earth Engine plugin for QGIS, installing using browser interface*

Кроме того, модуль обеспечивает идентификацию пользователя в GEE, которая выполняется путём получения пользовательского ключа (кода-пароля). При установке с использованием графического интерфейса QGIS, необходимая ссылка открывается в веб-браузере автоматически, и пользователь получает возможность, войдя в свою учётную запись Google (рис. 2), скопировать ключ и ввести его в также автоматически открывающемся диалоговом окне. В случае если окно браузера не открылось автоматически или произошёл иной сбой, получение и ввод ключа могут быть выполнены с использованием командной строки; пользователю предлагается открыть веб-ссылку, по которой может быть получен ключ, и ввести ключ непосредственно через командную строку (рис. 3).

После успешной установки модуля обращение к GEE API для Python происходит с использованием программного кода стандартным образом (рис. 4).



*Рис. 3. Установка модуля Google Earth Engine для QGIS с использованием командной строки*  
*Fig. 3. Google Earth Engine plugin for QGIS, installing using command line*



*Рис. 4. Обращение к функциям GEE API для Python через консоль Python в QGIS*  
*Fig. 4. Call of the GEE API for Python using QGIS Python console*

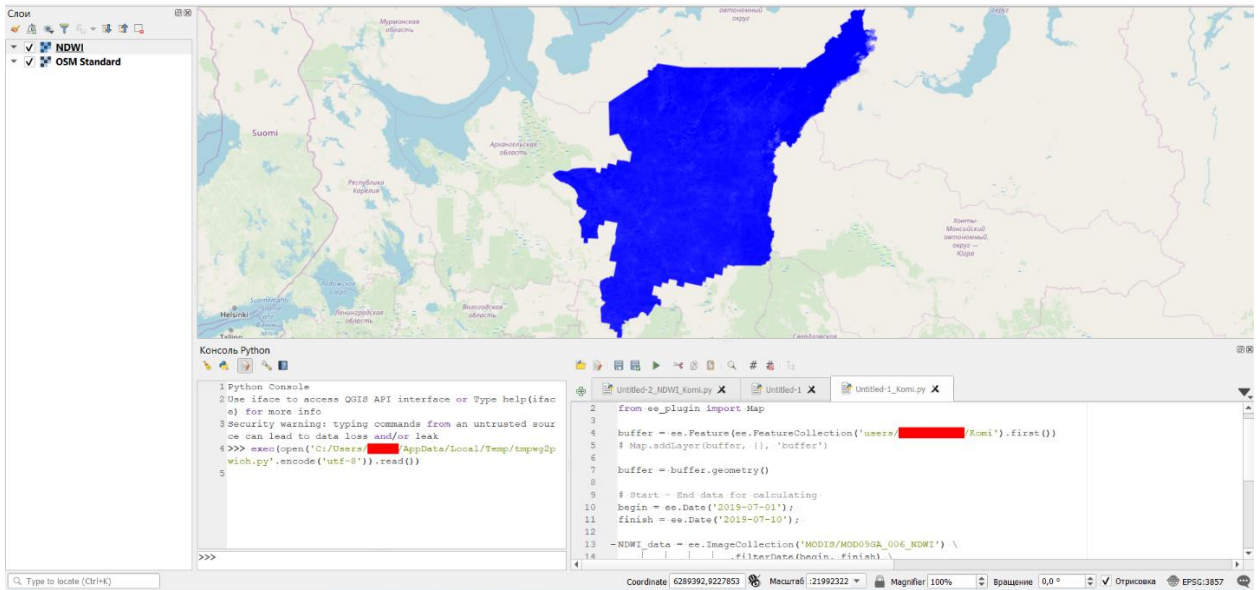


Рис. 5. Пример карты NDWI, рассчитанной на основе каналов снимка MODIS (продукт MOD09GA) и визуализированной в QGIS  
 Fig. 5. Example of the NDWI map computed basing on the MODIS imagery (MOD09GA product) and visualized in QGIS

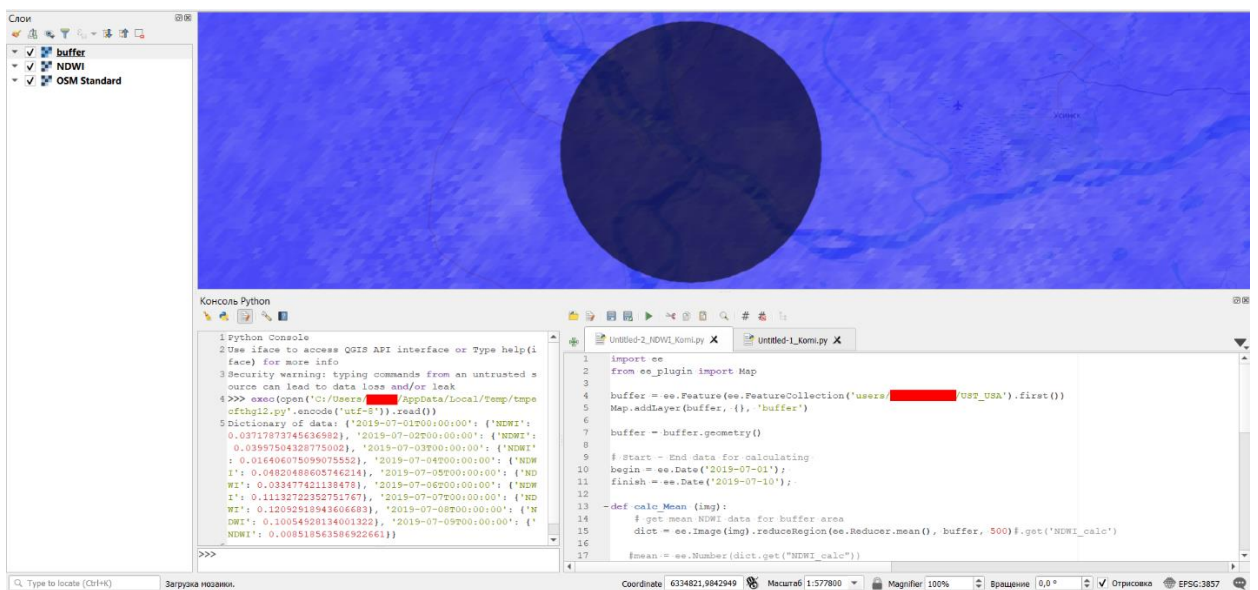


Рис. 6. Область интереса, использованная для вычисления средних значений NDWI для покрываемой ей территории на основе серии карт NDWI; список значений, вычисленных для заданного перечня календарных дат, отображается в консоли  
 Fig. 6. Area of interest used to compute mean NDWI values for the covered territory basing on NDWI map series; mean values for a list of the dates are presented in console panel



На рис. 5 и 6 приведены примеры визуализации данных GEE, выполненной в QGIS с использованием модуля и результаты извлечения научных данных с использованием функций GEE API для Python. Отрицательным результатом экспериментов стало заключение о том, что имеющимися в настоящее время средствами визуализации данных GEE в QGIS возможно осуществлять выгрузку данных на клиентский компьютер только в форме растровых карт, визуализированных в соответствии с некоторой цветовой палитрой (рис. 5) и непригодных для дальнейшего автоматизированного анализа (в связи с тем, что такие данные хранят информацию о цвете изображения, но не сами значения, например, вегетационного индекса, которые необходимы для анализа). Однако подобные выгружаемые данные, безусловно, могут быть использованы для визуального анализа обрабатываемых данных, а выгрузку научных данных возможно осуществить параллельно с использованием пользовательского программного кода (рис. 6); при этом последующая визуализация сформированных и сохранённых на клиентском компьютере данных может быть осуществлена дополнительно стандартными средствами QGIS путём добавления слоёв на карту.

В результате выполнения экспериментов по использованию GEE API для Python и модуля GEE для QGIS при выполнении операций с данными в GEE с отображением в QGIS, детального изучения технической документации к данным программным средствам и анализа ошибок и исключений, возникающих при создании пользовательских функций, реализующих запросы к данным, были сформулированы следующие основные технологические принципы для проведения дальнейшей работы:

- дальнейшая разработка должна вестись в форме самостоятельного модуля для QGIS (использование функциональности модуля GEE для QGIS в контексте решаемых задач в настоящее время выглядит нецелесообразным);
- интерфейс разрабатываемого модуля должен обеспечивать: выполнение операций растровой алгебры на стороне сервера для построения карт вегетационных индексов и производных карт параметров вегетационных сезонов; выгрузку результатов расчётов в форме отдельных значений и рядов значений; визуализацию результатов выгрузки данных в форме точечных векторных объектов с атрибутами, растровых слоёв (на основе выгрузки в точках — узлах регулярной сетки) и графиков (в частности, графиков годового хода вегетационных индексов);
- выгрузка растровых данных, как в форме карт, визуализированных в соответствии с цветовой палитрой, так и хранящих научные данные, пригодные для вычислений, должна быть реализована дополнительно, собственными средствами разрабатываемого модуля (на ранних этапах разработки должна параллельно использоваться доступная функциональность GEE для QGIS);
- отдельную задачу (дальний горизонт развития) составляет разработка функций, автоматизирующих анализ выгружаемых рядов данных (поиск характерных точек на графиках, построение трансект и т.д.).

## **ВЫВОДЫ**

В результате проделанной работы возможно сформулировать следующие основные выводы:

- существующие в настоящее время программные средства, позволяющие обеспечить сопряжение и совместное использование облачных инфраструктур пространственных данных и настольных ГИС, остаются несовершенными, что подтверждается ограниченной функциональностью как GEE для QGIS, так и GEE API для

Python, в технической документации к которому разработчики прямо указывают, что восстановить программное окружение для его ключевой библиотеки, аналогичное программному окружению, использованному разработчиками при её создании, может быть проблематичным, в связи с чем рекомендованным для работы с GEE является использование GEE API для JavaScript, но не GEE API для Python<sup>1</sup>;

- вместе с тем проведённые эксперименты демонстрируют работоспособность и эффективность внедрения принципов туманных вычислений при управлении пространственными данными путём совместного использования существующих облачных инфраструктур и настольных программных средств; облачная инфраструктура в таком случае позволяет существенно экономить ресурсы хранения данных и время на их передачу, обеспечивая выгрузку только интересующих пользователя данных, а универсальные настольные ГИС, в свою очередь, обеспечивают доступность широчайшего инструментария для анализа данных (данное утверждение, безусловно, касается случая, связанного с изучением конкретных географических объектов, но не, например, с решением задач, связанных с поиском закономерностей на основе массивов больших пространственных данных);

- в контексте выполняемого авторами исследования, совместное использование GEE и QGIS является перспективным; результаты проведённых экспериментальных работ демонстрируют, что задачи, связанные с картографированием вегетационных индексов и анализом их пространственно-временной динамики, могут быть выполнены с использованием ресурсов GEE путём выполнения запросов на обработку из среды QGIS, с последующим отображением и анализом данных в QGIS.

На следующем этапе работы, с учётом сформулированных в настоящей статье принципов, должен быть реализован авторский модуль для QGIS, обеспечивающий картографирование вегетационных индексов и дальнейшую обработку получаемых карт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведева М.А., Барталёв С.А., Лулян Е.А., Матвеев А.М., Толпин В.А., Пойда А.А.* Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 313–321.
2. *Миклашевич Т.С., Барталёв С.А.* Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24.
3. *Семенова І.Г.* Синоптичні та кліматичні умови формування посушливих явищ в Україні. Дис. ... докт. геогр. наук. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2015. 296 с. (на украинском языке).
4. *Agariou A.* Remote sensing heritage in a petabyte-scale: satellite data and heritage Earth Engine© applications. International Journal of Digital Earth, 2017. V. 10. Iss. 1. P. 85–102. DOI: 10.1080/17538947.2016.1250829.
5. *Delbart N.J-P., Kergoats L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G.* Determination of phenological dates in boreal regions using Normalized Difference Water Index. Remote Sensing of Environment, 2005. V. 97. Iss. 1. P. 26–38. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011.
6. *Gao B.C.* NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 1996. V. 58. Iss. 3. P. 257–266.

---

<sup>1</sup> [https://developers.google.com/earth-engine/python\\_install\\_manual#coding-in-the-python-api](https://developers.google.com/earth-engine/python_install_manual#coding-in-the-python-api)

7. *Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A.* Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*, 2007. V. 2. No 4. Article ID: 045031. 9 p. DOI:10.1088/1748-9326/2/4/045031.
8. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
9. *Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009. No 11. P. 2231–2238.
10. *Panidi E.* Fog Computing perspectives in connection with the current geospatial standards. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017. V. XLII-3/W2. P. 171–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-171-2017.
11. *Panidi E., Tsepelev V.* NDWI-based technique for detection of change dates of the growing seasons in Russian Subarctic. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017. V. XLII-3/W2. P. 179–182. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-179-2017.
12. *Rykin I., Shagnieva A., Panidi E., Tsepelev V.* Highly discrete mapping of the growing season time frames and time dynamics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019. V. XLII-3/W8. P. 357–361. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-357-2019.
13. *Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W.* A remote sensing-based system to predict early spring phenology over boreal forest. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010. V. XXXVIII (1). 5 p.
14. *Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmriche F., Houston S., Racinef C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweedie C., Noylek B., Silapaswanl C., Douglasm D., Grifithn B., Jiao G., Epsteino H., Walkerp D., Daeschnera S., Petersena A., Zhouq L., Myneni R.* Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic tundra ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2004. No 89. P. 281–308.
15. *Tsepelev V., Panidi E., Torloпова N., Bobkov A.* Study of climate change at the north of European Russia using land cover data. *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2015. V. 2. Iss. 3. P. 529–536. DOI: 10.5593/SGEM2015/B32/S14.071.
16. *Vermote E.* MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09A1.006.
17. *Vermote E., Wolfe R.* MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m SIN Grid V006 (Data set). 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09GA.006.
18. *Vos K., Splinter K.D., Harley M.D., Simmons J.A., Turner I.L.* Coast Sat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 2019. V. 122. Article No 104528. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104528.
19. *Warren M.S., Brumby S.P., Skillman S.W., Kelton T., Wohlberg B., Mathis M., Chartrand R., Keisler R., Johnson M.* Seeing the Earth in the Cloud: processing one petabyte of satellite imagery in one day. *IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 2015 (AIPR 2015). Article No 7444536. DOI: 10.1109/AIPR.2015.7444536.
20. *Yalew S.G., van Griensven A., van der Zaag P.* AgriSuit: a web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016. V. 128. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.compag.2016.08.008.

## REFERENCES

1. *Agapiou A.* Remote sensing heritage in a petabyte-scale: satellite data and heritage Earth Engine© applications. *International Journal of Digital Earth*, 2017. V. 10. Iss. 1. P. 85–102. DOI: 10.1080/17538947.2016.1250829.
2. *Delbart N.J-P., Kergoats L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G.* Determination of phenological dates in boreal regions using Normalized Difference Water Index. *Remote Sensing of Environment*, 2005. V. 97. Iss. 1. P. 26–38. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.011.
3. *Gao B.C.* NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. V. 58. Iss. 3. P. 257–266.
4. *Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A.* Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*, 2007. V. 2. No 4. Article ID: 045031. 9 p. DOI:10.1088/1748-9326/2/4/045031.
5. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
6. *Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009. No 11. P. 2231–2238.
7. *Medvedeva M.A., Bartalev S.A., Lupyan E.A., Matveev A.M., Tolpin V.A., Poida A.A.* The possibility of estimation of the growing season onset basing on satellite and meteorological data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2008. V. 5. Iss. 2. P. 313–321 (in Russian).
8. *Miklashevich T.S., Bartalev S.A.* Method for estimating vegetation cover phenological characteristics. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2016. V. 13. Iss. 1. P. 9–24. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24 (in Russian).
9. *Panidi E.* Fog Computing perspectives in connection with the current geospatial standards. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017. V. XLII-3/W2. P. 171–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-171-2017.
10. *Panidi E., Tsepelev V.* NDWI-based technique for detection of change dates of the growing seasons in Russian Subarctic. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017. V. XLII-3/W2. P. 179–182. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-179-2017.
11. *Rykin I., Shagnieva A., Panidi E., Tsepelev V.* Highly discrete mapping of the growing season time frames and time dynamics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019. V. XLII-3/W8. P. 357–361. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-357-2019.
12. *Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W.* A remote sensing-based system to predict early spring phenology over boreal forest. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010. V. XXXVIII (1). 5 p.
13. *Semenova I.G.* Synoptic and climatic conditions of formation of arid phenomena in Ukraine. *Diss. ... doct. geogr. sciences.* Odessa: Odessa State Ecological University, 2015. 296 p. (in Ukrainian).
14. *Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmliche F., Houston S., Racinef C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweediej C., Noylek B., Silapaswanl C., Douglasm D., Grifithn B., Jiao G., Epsteino H., Walkerp D., Daeschnera S., Petersena A., Zhouq L., Myneni R.* Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic tundra ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2004. No 89. P. 281–308.
15. *Tsepelev V., Panidi E., Torloпова N., Bobkov A.* Study of climate change at the north of European Russia using land cover data. *International Multidisciplinary Scientific Geo*

- Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2015. V. 2. Iss. 3. P. 529–536. DOI: 10.5593/SGEM2015/B32/S14.071.
16. *Vermote E.* MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09A1.006.
17. *Vermote E., Wolfe R.* MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m SIN Grid V006 (Data set). 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09GA.006.
18. *Vos K., Splinter K.D., Harley M.D., Simmons J.A., Turner I.L.* Coast Sat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 2019. V. 122. Article No 104528. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104528.
19. *Warren M.S., Brumby S.P., Skillman S.W., Kelton T., Wohlberg B., Mathis M., Chartrand R., Keisler R., Johnson M.* Seeing the Earth in the Cloud: processing one petabyte of satellite imagery in one day. *IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2015 (AIPR 2015)*. Article No 7444536. DOI: 10.1109/AIPR.2015.7444536.
20. *Yalew S.G., van Griensven A., van der Zaag P.* AgriSuit: a web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016. V. 128. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.compag.2016.08.008.
-