

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ LEFA И ENOE ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ

Шевырев С.Л.,

Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО РАН), Владивосток, Россия

Аннотация. Рассматривается возможность использования и кейсы применения программного обеспечения с графическим пользовательским интерфейсом и открытым исходным кодом проекта LEFA (Lineament Extraction and Fracture Analysis), разработанное в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН с целью выполнения исследовательских проектов в науках о Земле: для изучения перспективности территории на обнаружение рудных минерализаций, а также оценке рисков развития неблагоприятных геологических природных процессов. Программное обеспечение ruLEFA предназначено для оптического распознавания выраженности линеаментов (линейных элементов) в дистанционном изображении, а также учета параметров их пространственного распределения (плотности и связанности) и способно выводить распознанные объекты в виде массива векторных объектов в формате ESRI shapefile, а также формировать таблицу данных для машинного обучения. Программное обеспечение ENOE служит для выделения эрозионной сети на основе спутниковой цифровой модели рельефа и, помимо растрового и векторного представлений эрозионной сети, способно строить базисные поверхности для разнопорядковых водотоков, а также разностные поверхности. В зависимости от концепции научного исследования, наборы данных, получаемые в ходе работы, применимы для различных целей, от визуального представления территории, до проведения исследования, основанного на данных. Возможности развития обсуждаемого программного обеспечения могут стать основой для обучения студентов и молодых специалистов.

Ключевые слова. *Геоинформационные системы, прогноз минеральных ресурсов, открытый исходный код, программирование*

LEFA AND ENOE SOFTWARE FOR SATELLITE DATA PROCESSING FOR GEOLOGICAL CASES AND RESOURCE MANAGEMENT

Shevyrev S.L.

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. Opportunities and application cases have been considered for graphic user interface open source software associated with LEFA (Lineament Extraction Fracture Analysis) project. This software was developed in Far East Geological Institute of FEB RAS to achieve goals of earth sciences research projects, namely: study of area prospectivity for detecting of ore mineralizations and risk assessment of geological hazards. LEFA software is intended to optically detect lineaments (linear features) in remote sensing pictures, compute parameters of their spatial distribution (density and connectivity) and capable to render and output recognized objects as an array of vector objects in ESRI shapefile format and form data table for machine learning. ENOE software makes it possible to recognize erosional network over digital satellite relief model and apart of the raster and vector objects representing discreet streams could build basic surfaces for streams of the different order and their differential surfaces. Depending on research concept acquired datasets are applicable for different goals, from visualization of the area to conducting of the data driven research. Potential and possibilities of the considered software can provide methodological basis for teaching of the students and junior specialists.

Keywords. *Geographic information system, prospectivity of the mineral resources, open source software, software development*

Введение. Использование проприетарных географических информационных систем (ГИС) в бюджетных исследовательских проектах сопряжено с рядом проблем: приобретение затруднено приостановкой сотрудничества вендоров с отечественными ритейлерами, а интерпретация опубликованных результатов и их воспроизводимость читателями также ограничены.

Приложения и их модули предназначенные для решения конкретных задач могут быть недостаточно специализированы, исходный код закрыт, а справочные материалы и поддержка недостаточны. Исследовательское программное обеспечение с открытым исходным кодом выпускается и поддерживается специалистами в предметной области, мотивация которых отличается от корпоративных вендоров геоинформационных систем. Открытый исходный код позволяет увидеть как программа устроена и работает, а при необходимости, принять участие в разработке и развитии проекта, и, если условия использования позволяют, адаптировать исходный код под свои нужды. Примером такого исследовательского проекта является “LEFA (Lineament Extraction and Fracture Analysis” (англ.) — выделение линеаментов и анализ трещиноватости) [4].

Целью настоящего исследования является демонстрация возможностей приложений проекта LEFA [4] широким категориям пользователей. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: описание средств разработки и используемых вычислительных средств, рассмотрение алгоритмов и кейсов применения.

Материалы и методы. Современное состояние развития языка python и располагаемых библиотек работы с данными (*pandas, psycopg2, scikit-learn, tensorflow* и других), численного моделирования (*numpy*) и поддержки форматов файлов с геопривязкой (*gdal* для работы с *ESRI shape, geotiff* и другими) позволяют рассматривать его как мощное и свободно распространяемое средство научных расчетов, пространственного моделирования и разработки открытых географических информационных систем. Возможность работы с библиотеками графического пользовательского интерфейса (*pyQT*) позволяет создавать оконные приложения и утилиты для решения узко специализированных задач [3, 5]. Наглядно алгоритм работы программы ruLEFA 0.61a представлен на рисунке (рис. 1).

Алгоритм работы ruLEFA 0.61a включает 3 этапа, состоящих из последовательно выполняемых операций: выбора, открытия файлов, настройки параметров анализа изображения и детектирования объектов, а также экспорта объектов и параметров их распределения в поддерживаемые форматы файлов (см. рис. 1).

Работа начинается с открытия спутникового изображения и его визуальной оценки; затем следует установка параметров для детектирования границ и распознавания элементов, также возможна работа с параметрами по умолчанию, идентифицированные линейные элементы (линеаменты) первого и второго порядка экспортируются (см. рис. 1, этап 1). На втором этапе производится создание основы для машинного обучения — таблицы экспериментальных данных, включающих сведения о плотности вероятности встречаемости загружаемых точечных объектов и параметров рисунка выявленных структурных элементов (см. рис. 1, этап 2). Третий этап требует наличие установленного ГИС-приложения, в котором экспортированные из ruLEFA данные сопоставляются с геологическими структурами. Реализация этого средствами, входящими в состав ruLEFA, может стать целью дальнейшего развития приложения.

Анализ базисных поверхностей — классический метод современной геоморфологии и морфометрии, позволяющий изучать развитие речных систем и закономерности неотектонических движений. В основе этого метода анализа цифровой модели рельефа лежит допущение, что речные потоки одного порядка были сформированы на исследуемой территории в одно время. Водоток или русло водотока, лишённые притоков, считаются водотоком первого порядка (число Стрейлера равно 1); водоток, притоки которого являются водотоками первого порядка, имеет число Стрейлера 2, если в водоток впадает хотя бы один водоток второго порядка, то он имеет порядок 3 [6].

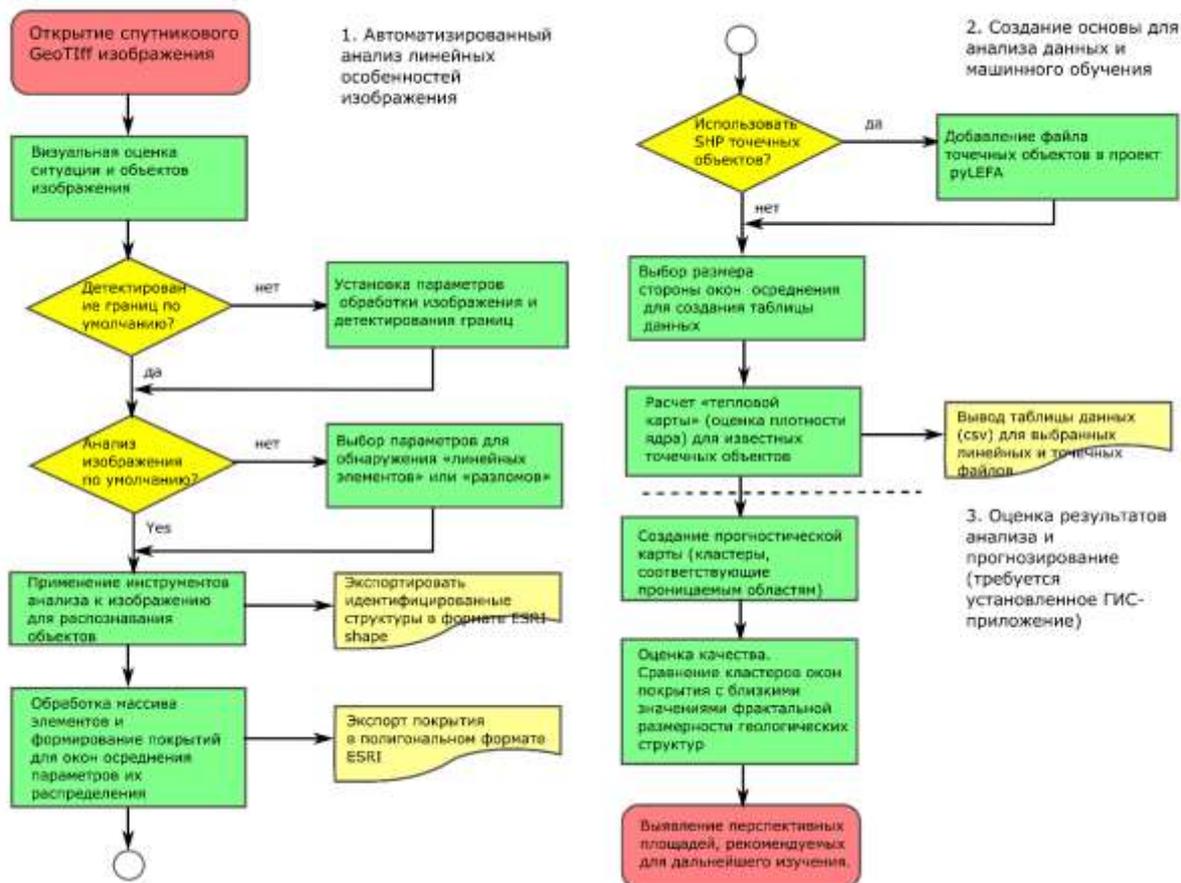


Рис. 1. Графическое представление алгоритма работы программы ruLEFA 0.61a [5]

Во время заложения эрозионной сети гипсометрические отметки базисной поверхности водотоков описывают относительное положение базиса эрозии во время заложения этого порядка. Опускание базиса эрозии (при наступлении морской регрессии или формировании локальных поднятий) приводит к образованию притоков и увеличению порядка ранее сформированных водотоков. Построение базисных поверхностей выполняется по методу В.П. Философова [1, 2], с учетом растрового формата представления значений абсолютных отметок и водотоков: в качестве точек для интерполяции базисных поверхностей выбираются пиксели, соответствующие руслам определенного порядка и для них по ЦМР выбирается значение абсолютных отметок (рис. 2). Программа ENOE использует библиотеку *pysheds* для выделения эрозионной сети, построений и выполнения отчетов. Так как и для ruLEFA, исходный код этого приложения находится на популярном репозитории (<https://github.com/SergeiShevyrev>). В случае ENOE, в папке *data_analysis* присутствуют скрипты, предназначенные для получения набора данных на основе вывода программы, что было использовано в прогнозе россыпной золотоносности [2].

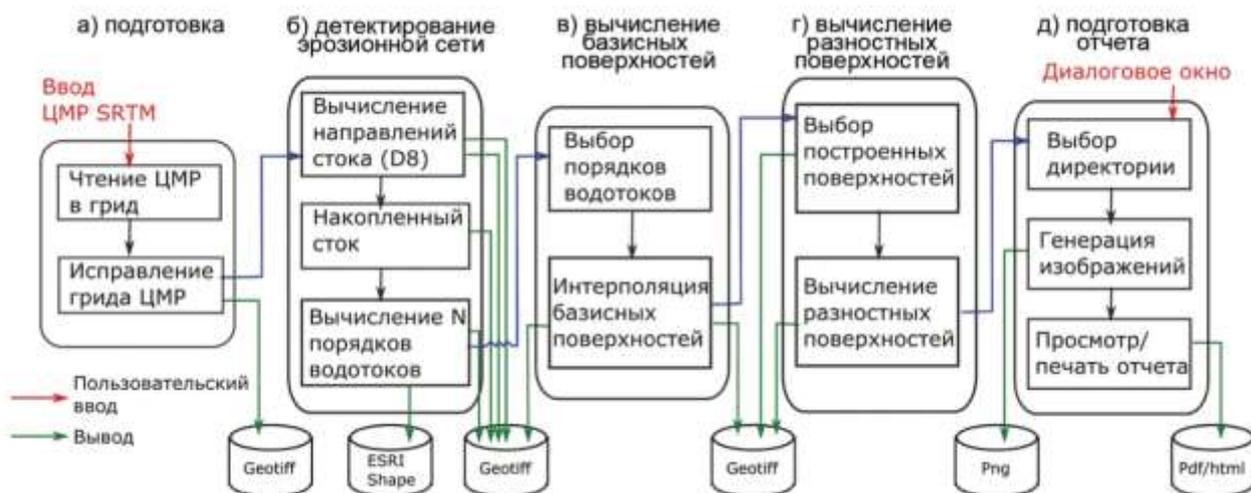


Рис. 2. Поток обработки данных в приложении ENOE 0.6a от ввода ЦМР до вывода отчета [2]

Результаты и обсуждение. Программное обеспечение (ПО) ruLEFA и ENOE были использованы для оценки перспективности территории на россыпную и коренную золотоносность с помощью обработки дистанционной основы и машинного обучения. Приводимые работы являются попытками проведения прогнозного геологического исследования основанного на данных (data driven). Такой подход в организации и проведении исследований позволяет описать надежность создаваемых моделей и достоверность выводов с опорой на данные и модели машинного обучения. Для линеamentного исследования это классификация территории с применением метода неконтролируемой классификации («обучение без учителя») k-средних, а для использования оценки базисных и разностных поверхностей — максимальной энтропии (MaxEnt) [2].

Интерфейс программы ruLEFA 0.61a включает главное окно с кнопочной панелью, нажатие на кнопки вызывает отдельные инструменты для анализа (рис. 3).



Рис. 3. Интерфейс программы ruLEFA 0.61a

Исследования коллег, применявшие ПО LEFA для оценки коровой трещиноватости территории и сопоставления их с эпицентрами землетрясений и обеспечения техносферной безопасности приведены в разделе «Наши пользователи» [4]. Условием применения

программного обеспечения является размещение ссылок на публикации проекта или его сайт [4], по этой причине раздел с кейсами применения постепенно пополняется.

Выводы.

Рассмотренное программное обеспечение используется в геологических организациях разных стран для проведения исследований различного профиля, результаты использования опубликованы в рейтинговых научных журналах в России и зарубежом. Язык *python* в настоящее время динамически развивается и является заменой проприетарного Matlab, что дает дополнительный импульс для развития питонических приложений проекта. Независимые исследователи и отдельные коллективы приглашаются к развитию проекта и адаптации приложений под свои задачи.

Литература

1. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: СГУ, 1975. 232 с.
2. Шевырев С.Л., Борискина Н.Г. Анализ перспективности территории Сихотэ-Алинского подвижного пояса (Хабаровский край) на обнаружение россыпей методом базисных поверхностей с помощью программного обеспечения ENOE и MaxEnt // Тихоокеанская геология, 2025, том 44, No 1, с. 73–88.
3. Шевырев, С. Л. Разработка программного обеспечения pyLEFA для анализа дистанционного изображения с целью прогноза минеральных ресурсов / С. Л. Шевырев. Текст: непосредственный // Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции “Геоинформационное картографирование в регионах России”. Воронеж: "Цифровая полиграфия", 2024. — С. 258-263.
4. LEFA. Lineament Extraction and Fracture Analysis. <http://lefa.geologov.net> (дата обращения 8.03.2025).
5. Shevyrev, S., Boriskina, N. Analysis of Structural Position of Carlin-Type Gold Deposits with Lineament Analysis of Remote Sensing Data Using pyLEFA Software. Minerals 2025, 15, 219. <https://doi.org/10.3390/min15030219>
6. Strahler A.N. Quantitative analysis of watershed geomorology // Eos Trans, AGU. 1957. 38(6). P. 913–920.