

Региональное геологическое строение севера Аравийской плиты и перспективы нефтегазоносности территории Сирии по данным комплексной обработки результатов спутниковых и гравиметрической съемок

В.И. Горный¹, О. Ammar², А. Kafri², А.В. Киселев¹,
С.Г. Крицук¹, И.Ш. Латыпов¹, Н. Minini²

¹ ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

² General Organization of Remote Sensing, Syria
Damascus, P.O.Box: 12586
E-mail: gors@mail.sy

Для изучения регионального геологического строения севера Аравийской плиты была подготовлена информационная основа масштаба 1:1 000 000 с использованием цифровых материалов съемок спутниками NOAA(AVHRR), Terra(MODIS), цифровой модели рельефа, полученной миссией SRTM с разрешением 90 м и карты приращения поля силы тяжести ΔG . По результатам многократной съемки спутниками NOAA(AVHRR), Terra(MODIS) построена карта конвективного теплового потока. Выполнен автоматизированный линеаментный анализ. В результате автоматизированного решения обратной гравиметрической задачи построены послойные карты и разрезы кажущейся плотности коры и верхней мантии. Анализ регионального геологического строения и закономерностей нефтегазоносности выполнен на основе геологического дешифрирования палеоструктур восходящей мантийной конвекции и палеодвижений Аравийской плиты. Построены трехмерные диаграммы, позволившие выявить геодинамические и структурные закономерности размещения известных месторождений углеводородов. С целью формализованного выявления нефтегазоперспективных площадей выполнена эталонная классификация, подготовленного многомерного признакового пространства.

Ключевые слова: Аравийская плита, космические материалы, поле силы тяжести, обратная задача, мантийная конвекция, геодинамика, комплексная обработка, нефтегазоносность.

Введение

Ранее на примере Западно-Сибирской и Волго-Уральской нефтегазоносных провинций (НГП) разработана технология комплексной обработки цифровых спутниковых и геофизических материалов для выявления нефтегазоперспективных территорий (Горный и др., 2008). Технология включает в себя две параллельные технологические ветви обработки материалов, которые выполняются независимо. Первая – представлена традиционной методикой визуального (качественного) геологического дешифрирования. Новым в этой методике является дешифрирование палеопозиций восходящей мантийной конвекции и палеодвижений литосферной плиты, которые определяют региональные минерагенические закономерности (Горный, 2000, 2005, Gornyi, 2002). На этом основании делается выбор внешних по отношению к исследуемой площади эталонов – известных месторождений углеводородов. Визуальное геологическое дешифрирование использует дешифровочные признаки, основанные на генетических моделях месторождений углеводородов.

Вторая технологическая ветвь представляет собой количественное прогнозирование. При этом используется эталонная классификация, которая в плане прогнозирования является развитием метода аналогий. В результате количественного прогнозирования не только выявляются участки аналогичные по комплексу признаков эталонам, но и дается количественная

характеристика их схожести с эталонами в виде вероятностей: «подобия», «ложной тревоги» и «пропуска цели». При этом стратегия прогнозирования ориентируется на минимизацию вероятности «ложной тревоги». Это обусловлено экономическими соображениями, т.к. стоимость последующих геологоразведочных работ несравненно выше, чем затраты на региональный прогноз. Соответственно, цена ложного прогноза чрезвычайно велика. Поэтому на этом этапе необходимо выявить хотя бы один перспективный участок, но с максимальной надежностью. На последнем этапе производится сравнение результатов визуального дешифрирования и перспективных участков, выявленных с помощью формализованных методик. Далее выполняется ранжирование выделенных площадей по степени перспективности.

В качестве региона для применения технологии выбрана северная часть Аравийской плиты (АП). В пределах АП выявлены гигантские по запасам месторождения нефти. В то же время, часть АП исследована в геологическом отношении недостаточно. Поэтому имеются определенные перспективы для открытия месторождений углеводородов, тем более, если прогнозирование использует новые геологические представления - такие как мантийная конвекция.

Следует отметить, что АП расположена в аридной зоне, где проектное покрытие растительности минимально, что открывает дополнительные возможности для применения материалов спутниковых съемок. Наконец, известно, что АП плита в недавнее в геологическом плане время испытала тектономагматическую активизацию, что повышает эффективность применения материалов спутниковых съемок и облегчает геологическое дешифрирование.

1. Материалы и методы

1.1 Материалы

В рамках настоящего исследования были использованы цифровые материалы съемок, выполненные следующими спутниками (Таб. 1):

Таблица 1. Цифровые материалы спутниковых съемок

Спутник	Сканер	Дата дд.мм.гггг	Время (Гринвич), чч:мм
Terra	MODIS	29.05.2006	08:30
Aqua	MODIS	29.05.2006	10:05
Terra	MODIS	29.05.2006	19:35
Aqua	MODIS	29.05.2006	23:50
Terra	MODIS	30.05.2006	07:35
Aqua	MODIS	30.05.2006	10:50
Terra	MODIS	30.05.2006	19:40
Aqua	MODIS	30.05.2006	22:25

Цифровая матрица приращения поля силы тяжести ΔG в редукции Буге была получена с сайта: http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_grav.html. Для расчета поля ΔG Д.Т. Сандвеллом и В.Х.Ф. Смитом (Sandwell, 2009) использована глобальная гравитационная модель EGM2008. Для интерполяции исходных данных применен бигармонический сплайн. Погрешности поля ΔG оцениваются как 2.0 – 4.0 мГал.

За топографическую основу была принята DCW векторная карта в UTM проекции, зона 37N (WGS84).

В качестве одного из информационных слоев использована цифровая модель рельефа (ЦМР) полученная радиолокационной топографической миссией Шаттл (SRTM). Геометрическое разрешение на местности 90 м.

В качестве геологической основы использована геологическая карта АП с указанием месторождений углеводородов и нефтегазовых провинций (Pollastro et al., 1998).

1.2 Методы обработки исходных материалов

Для получения информации о геотермической активности и тепловых свойствах дневной поверхности северной части АП был использован дистанционный геотермический метод (ДГМ), основанный на обработке материалов инфра-красной тепловой и многоспектральной съемок. Алгоритм построения карт конвективного теплового потока, тепловой инерции и скорости испарения влаги с поверхности описан в работах (Gornyy et al., 2010, Горный, 2011).

Для получения количественной информации о нарушенности земной коры использовался автоматический линеаментный анализ. Автоматическое построение линеаментов и кольцевых структур с последующим построением карт статистик пространственного распределения линеаментов выполнено по изображениям ближнего инфракрасного диапазона спектра электромагнитных волн, полученных спектрорадиометром MODIS.

Для обработки гравиметрических материалов использован алгоритм автоматического решения обратной гравиметрической задачи, основанный на представлении неизвестной плотности горных пород в форме линейной комбинации базисных функций. Полученные таким образом плотности 3-х мерной модели коры являются кажущимися, т.к. задача является некорректной и не допускает построение точного решения. В данном случае кажущаяся плотность горных пород получена для 10 слоев. Толщина каждого слоя 3 км, соответственно плотностная модель коры построена до глубины 30 км. В результате, с использованием специальной программы по любому заданному профилю могут быть построены разрезы кажущейся плотности, либо карты глубин поверхности любой заданной плотности горных пород, например 2300 кг/м³, что приблизительно соответствует поверхности фундамента.

Для визуального геологического дешифрирования была подготовлена серия цветовых RGB композитов по цифровым материалам, полученным спутниковым спектрорадиометром MODIS. Одно из набора таких изображений представлено на рис. 1.

При тектоническом дешифрировании использовались следующие дешифрировочные признаки палеопозиций структур восходящей мантийной конвекции, основанные на результатах математического моделирования мантийной конвекции (Trubitsyn, Rykov, 1998 а, б, Лобковский., Котелкин , 2000) и опыте дешифрирования таких структур (Горный, 2000, . Gornyi, 2002, Горный, 2005):

- диаметр кольцевых структур должен составлять порядка 1000 – 1500 км;
- должно наблюдаться поднятие в центре кольцевой структуры;
- кольцевые структуры должны составлять последовательную цепь;
- сдвиг центров кольцевых структур соответствует вектору палео-перемещения литосферной плиты.

2. Результаты

2.1 Региональная геологическая структура и новейшие геодинамические движения АП

В результате визуального дешифрирования спутниковых материалов была подготовлена схема тектонического дешифрирования (рис. 2).

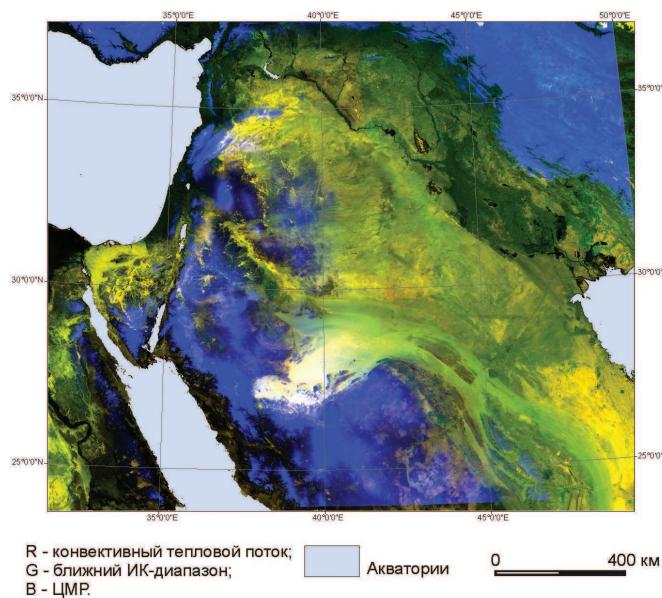


Рис. 1. RGB цветовой композит северной части АП

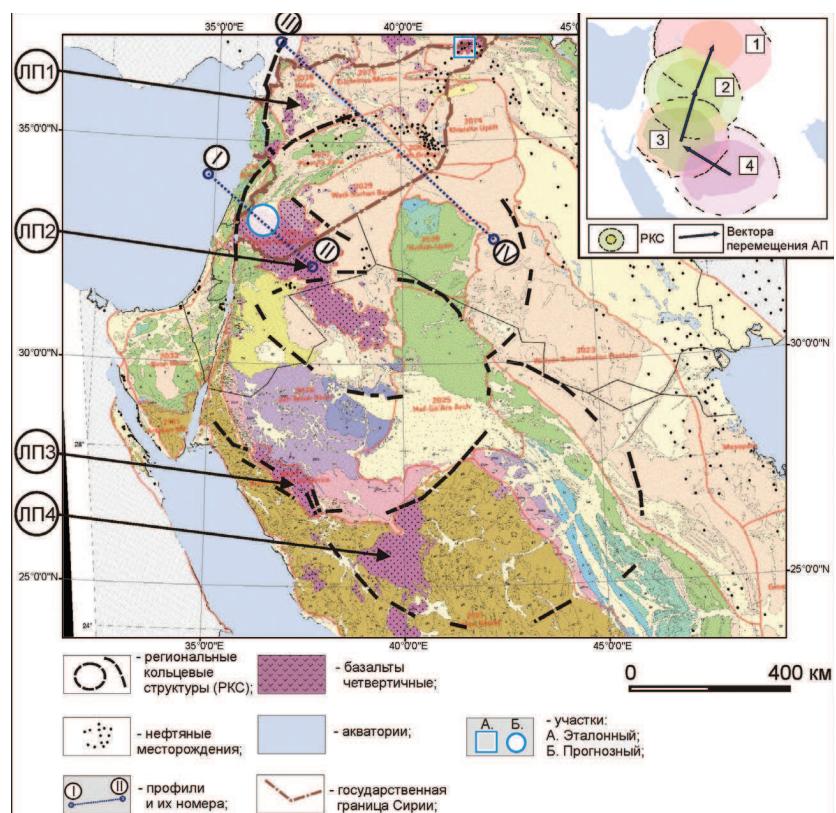


Рис. 2. Геологическая карта АП (по Pollastro, Karshbaum, Viger, 1998. Подробную легенду карты см. на: <http://pubs.usgs.gov/of/1997/of-97-470/OF97-470B/arabGmap.html>) с элементами тектонического дешифрирования спутниковых и геофизических материалов. ЛП1, ЛП2, ЛП3 и ЛП4 – соответственно лавовые покровы в пределах РКС №1, РКС №2, РКС №3 и РКС №4. В верхнем правом углу на врезке показана схема расположения РКС и вектора палеопримечаний АП

Четыре региональные кольцевые структуры (РКС) выявлены в северной части АП (см. врезку на рис. 2). Диаметры этих РКС составляют 800 – 1 000 км. Все РКС обладают хорошо выраженной внешней (краевой) зоной шириной 100-200 км и локальной центральной кольцевой структурой диаметром 200-300 км. Специфической особенностью этих РКС является наличие покровов четвертичных базальтов в юго-западных частях внешних зон РКС

(см. 1-4 на рис. 2). Более того, наблюдается приблизительно одинаковое смещение каждой из РКС по отношению к соседним РКС, а РКС №1-3 смешены по отношению друг к другу в одном и том же направлении. Направления векторов смещения этих РКС совпадают с направлением современного перемещения АП, зарегистрированного GPS приемниками (McClusky et al. 2003, 2010). Аналогичная цепь РКС была выявлена в пределах Восточно-Европейской платформы (Горный и др., 2008). Эта цепь РКС была интерпретирована как цепь палеопозиций Московского мантийного плюма, сформированной в коре при движении литосферной плиты (Горный, 2001), в понимании этого термина, данного в (Trubitsyn, Rykov, 1998 а).

Результаты автоматического решения обратной гравиметрической задачи позволили исследовать глубинное строение РКС, выявленных в пределах северной части АП. Так, северная часть внешней зоны РКС № 1, где на поверхности развиты покровы четвертичных базальтов (самый северо-восток Сирии (см. рис. 2) соответствует глубокому осадочному бассейну, ограниченному воздыманиями плотного мантийного вещества. Такой же подъем мантийного вещества (внедрение в кору мантийных диапиров) наблюдается в юго-западной части внешней зоны РКС № 2 (см. 1 и 2 на плотностном разрезе I-II, рис. 3).

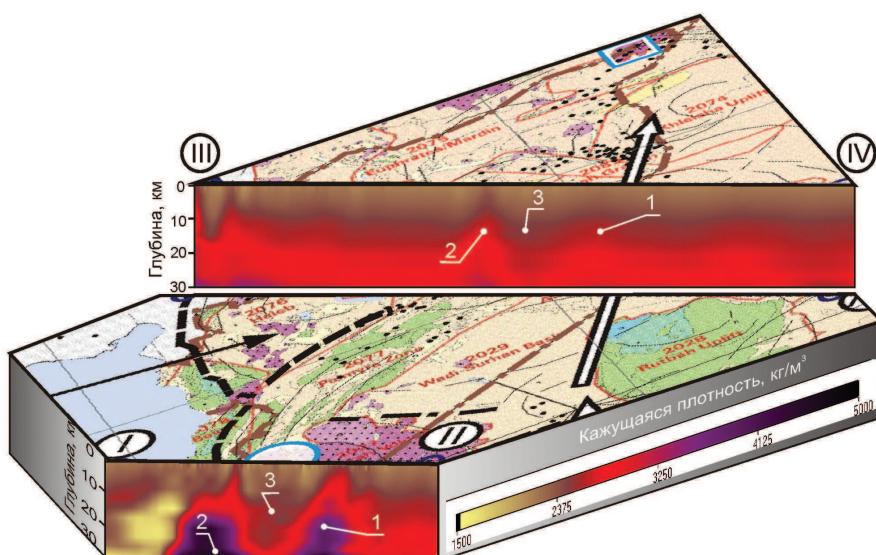


Рис. 3. Разрезы земной коры, демонстрирующие плотностные особенности в краевой части РКС №2 по профилям I – II, III – IV и в районе прогнозируемого перспективного участка. Условные обозначения к карте см. на рис. 2

На плотностных разрезах земной коры, пересекающих по профилям I - II и III - IV внешнюю зону РКС № 2, отмечается желоб (3 на рис. 3) - Пальмирский авлакоген (Минини, 1994), разделяющий кольцевые подъемы фундамента. В пределах Сирии на поверхности, краевая зона РКС № 2 представлена Пльмиридами – цепью возвышенностей (см. Palmira zone на рис. 2). Очевидно, что Северо-Харахское (North Harrah) вулканическое плато (см. ЛП2 на рис. 2), в пределах которого еще в середине XIX века отмечалась вулканическая активность, есть результат внедрения мантийного диапира (см. 1 на рис. 3). Необходимо отметить, что наблюдаемая картина полностью совпадает с моделью мантийного плюма, предложенной Г. Дэвисом (Davies, 1998). В соответствии с этой моделью внедрение мантийного плюма в низы коры приводит к трещинным излияниям эффузивов и формированию лавовых плато в периферийной зоне палеопозиции плюма. Поэтому можно сделать вывод, что выявленные РКС индицируют палеопозиции мантийных плюмов, а наличие четвертичных лавовых покровов указывает на то, что эти палеопозиции окончательно сформировались в Четвертичный период.

Сопоставление результатов решения обратной гравиметрической задачи и визуального дешифрирования с пространственным распределением известных месторождений углеводородов (рис. 2) показало, что группа месторождений локализована в пределах Пальмирского авлакогена. Это позволяет для АП считать краевые зоны РКС в качестве нефтеперспективных территорий (анalogичный вывод был получен и для Западно-Сибирской НГП).

Опыт применения настоящей технологии прогнозирования нефтегазоперспективных территорий, полученный в Волго-Уральской НГП (Россия) показал, что все месторождения нефти могут быть разбиты на две крупные группы: - месторождения глубоких осадочных бассейнов, имеющие, скорее всего, органический генезис; - месторождения локализованные в чехле над поднятиями фундамента, которые могут иметь как органический, так и неорганический генезис. Поэтому был проведен анализ закономерностей локализации известных в пределах территории Сирии месторождений углеводородов над мантийными диапирами и в пределах глубоких осадочных бассейнов. Выявлено, что часть известных месторождений нефти локализована в пределах глубоких осадочных бассейнов, например Пальмировский авлакоген. Есть группы месторождений локализованных над мантийными диапирами, кажущаяся плотность которых превышает $3000 \text{ кг}/\text{м}^3$. В связи с этим, цифровые карты глубин поверхности пород с кажущейся плотностью более $2300 \text{ кг}/\text{м}^3$ (мощность чехла) и более $3000 \text{ кг}/\text{м}^3$ (поверхность мантийных диапиров) были включены в информационный пакет для формализованного прогнозирования нефтегазоперспективных площадей.

Окончательно, в результате визуального дешифрирования были сделаны следующие выводы:

1. В северной части АП расположены 4 палеопозиции мантийного плюма, сформировавшиеся в Четвертичный период.
2. В Четвертичное время АП перемещалась, в основном, в Север-Северо-Восточном направлении, совпадающем с современным направлением перемещения АП. В заключительный период формирования РКС № 3 АП перемещалась в Северо-Западном направлении.
3. Внешние зоны палеопозиций мантийного плюма являются областями, благоприятными для формирования месторождений углеводородов.

2.2 Результаты формализованного прогнозирования нефте-перспективных территорий

Для формализованного прогнозирования на основе эталонной классификации было выбрано 9 эталонных нефтяных полей, расположенных в районах, отличающихся по геологическому строению. В настоящей работе представлены результаты, полученные только с использование эталона, расположенного в самой северо-восточной части территории Сирии (рис. 2). Это нефтяное поле интересно тем, что оно расположено в краевой зоне РКС №1. С поверхности территории представлена лавовым покровом. В целом, тектоническая ситуация близка к той, которая показана на рис. 3 в районе Северо-Харахского вулканического плато. Результат формализованного прогноза показан на рис. 2 и рис. 3. Вероятность подобия этой территории эталону по использованному комплексу признаков составила 0,99. Дополнительный качественный анализ геологической ситуации показывает, что прогнозируемый участок представляет собой глубокий осадочный бассейн (юго-западное продолжение Пальмировского авлакогена) обрамленный с северо-запада и с юго-востока четко выраженными поднятиями фундамента, сформированными мантийными диапирами. Это указывает на наличие весьма благоприятных условий для формирования месторождений углеводородов как органического, так и неорганического генезиса, т.к. в течение Четвертичного периода в осадочный бассейн поступала энергия и вещество мантийного происхождения.

Проведенные исследования позволяют отметить, что технология комплексной обработки спутниковых и геофизических материалов (Горный и др., 2008), разработанная в услови-

ях тундровой, таежной и степной зон, позволяет также выполнять обоснованный прогноз нефтегазоперспективных территорий и в аридной зоне при условии минимальной информации о геологическим строении изучаемой территории. Это позволяет рекомендовать эту технологию для обоснования выбора лицензионных участков в пределах территорий, расположенных в ландшафтных зонах от тундры до пустынь.

Литература

1. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. №2. С. 179-194.
2. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Количественная оценка перспектив нефтегазоносности территорий на основе комплексной обработки материалов космических и геофизических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т.5. № 1. С. 349 - 355.
3. Горный В.И. Минерагенические закономерности как результат движения плит и мантийной конвекции (по космическим материалам) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Том. 2. №2. С. 182-197.
4. Горный В.И. Характеристика распределения температуры земной поверхности на Южном Урале // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс). Тверь: ГЕРС. 2001. – С. 127-135.
5. Горный В.И. Геодинамика Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (по данным дистанционного геотермического метода) // Региональная геология и металлогения. 2000. №12. С.76-86.
6. Лобковский Л. И., Котелкин В. Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции в мантии и ее геодинамические следствия // Проблемы глобальной геодинамики. Под ред. Д. В. Рундквиста. М.: ГЕОС, 2000. С. 29-53.
7. Минини Х. М. Геологическое строение осадочного чехла Юго-Восточной Сирии по геофизическим данным и перспективы нефтегазоносности палеозойских и триасовых отложений: Дис. на соискание ученой степени канд. геолого-минералогических наук: 04.00.12. СПб. 1994. 129с.
8. Трубицын В.П., Рыков В.В. Мантийная конвекция и глобальная тектоника Земли // Труды теоретического семинара Проблемы глобальной геодинамики и металлогении. El-Pub © VESTNIK OGGGN RAN © No 1(3)'98. 1998a.
9. Davis Geoff. A channeled plume under Africa // Nature. 1998. Vol.395. P.743-744.
10. Gornyy V.I., Kritsuk S.G.. Latypov I.Sh. Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance // Journal of Environmental Protection. 2010. No1. P. 242-250
11. Gornyi V.I. The Mantle Convection and the Drift of Euro-Asian Plate (According the Remote Geothermal Method Data) // Proceedings of the IGARSS 2002 & 24-th Canadian Symposium on Remote Sensing. 24-28 June 2002.Toronto, Canada. 0-7803-7537-8/02/\$17.00© 2002 IEEE. Vol. IV. P. 2029-2035.
12. McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., and Tealeb A. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions // Geophys. J. Int. 2003. Vol. 155. P. 126-138.
13. McClusky S., Reilinger R., Ogubazghi G., Amleson A., Healeb B., Vernant Ph., Sholan J., Fisseha S., Asfaw L., Bendick R., and Kogan L. Kinematics of the southern Red Sea–Afar Triple Junction and implications for plate dynamics // Geophysical research letters. 2010. Vol. 37. P. 1-5.
14. Richard M. Pollastro, Anny S. Karshboum, and Roland J.Viger. Map showing geology, oil and gas and geologic provinces of Arabian Peninsula: <http://pubs.usgs.gov/of/1997/ofr-97-470/OF97-470B/arabGmap.html>. 1998.
15. Sandwell, D. T., and W. H. F. Smith. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate // J. Geophys. Res. 2009. No 114 B01411. P. 18: <http://topex.ucsd.edu/sandwell/publications/122.pdf>.
16. Trubitsyn V. P. and Rykov V. V. A Self-Consistent 2D Model of Mantle Convection with a Floating Continent // Russian Journal of Earth Sciences. 1998. Vol 1, No 1. P. 10.

Regional Geological Structure of the Northern Part of Arabian Plate and Hydrocarbon Perspective of Syrian Territory According to Complex Processing of Satellite and Gravimetric Data

V.I. Gornyy¹, O. Ammar², A. Kafri², A.V. Kiselev¹, S.G. Kristsuk¹, I.Sh. Latypov¹, H. Minini²

*¹ Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences
18, Korpusnaya Str. Saint-Petersburg, 197110, Russia*

E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

*² General Organization of Remote Sensing, Syria
Damascus, P.O.Box: 12586
E-mail: gors@mail.sy*

The aim of this paper is to investigate the regional geological structure of the Arabian Plate and to reveal new perspective oil-bearing areas. The set of maps was prepared by using digital data acquired by NOAA (AVHRR) and Terra (MODIS) satellites, as well as the SRTM digital elevation model and the gravity field ΔG in the Bouguer reduction. The map of convective heat flux was compiled by using the results of multiple satellite survey. The automatic lineament analysis was carried out. Multilayer system and cross sections of apparent rock density of crust and upper mantle were obtained as the automatic solution of ill-posed problem of gravimetry. The analysis of regional geological structure of the Arabian Plate, as well as the major regularities of oilfields spatial distribution according the palopositions of uplifting mantle convection structures and Arabian Plate drifts were done on the base of satellite data visual interpretations. The supervise classification was carried out for the oil-bearing areas prognostication.

Keywords: the Arabian Plate, satellite data, a gravity field, an inverse problem, mantle convection, geodynamics, a complex processing, oil fields.