

БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ ИМПАКТНОГО КРАТЕРА СИЛЬЯН

Ю.И. Пиковский¹, М.П. Гласко², В.Г. Кучеров^{3,4}

¹ Московский государственный университет, 119991, Москва, Ленинские горы, Россия

² Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия

³ Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 119991, Москва, Ленинский просп., 65, Россия

⁴ KTH Royal Institute of Technology, SE-10044, Stockholm, Sweden

По результатам морфоструктурного моделирования блоковой структуры части территории Скандинавского кристаллического щита установлено, что кольцевая структура импактного кратера Сильян находится в центре морфоструктурного узла — обширной кольцевой структуры диаметром 300 км, отражающей крупный дизъюнктивный тектонический узел. На территории кратера выделяется центральный блок, представленный гранитным массивом, и окаймляющая его подвижная морфоструктурная граница в виде широкой мелкоблоковой кольцевой зоны депрессий. К последней приурочены проявления нефти и газа в пределах кратера. Эта зона рассматривается как наиболее перспективная для поисков очагов миграции и нетрадиционных скоплений углеводородов.

Импактный кратер, морфоструктурное моделирование, блоки земной коры, скопления углеводородов.

THE BLOCK STRUCTURE AND THE PRESENCE OF OIL AND GAS IN THE SILJAN IMPACT CRATER

Yu.I. Pikovsky, M.P. Glasko, and V. G. Kuchеров

Morphostructural modeling of the block structure of part of the Scandinavian crystalline shield has shown that the ring structure of the Siljan Ring impact crater is located in the center of a morphostructural node, a ring structure with a diameter of 300 km, marking a large disjunctive knot. The crater area consists of a central block, which is a granite massif, and of a surrounding mobile morphostructural boundary forming a wide small-block ring depression zone, where oil and gas shows have been revealed. This zone is regarded as the most promising one for the search for migration channels and atypical shows of hydrocarbons.

Impact crater, morphostructural modeling, Earth's crust blocks, hydrocarbon shows

ВВЕДЕНИЕ

Проявления нефти и углеводородного газа на Скандинавском кристаллическом щите в Центральной Швеции в районе импактного кратера Сильян (Siljan) известны около 300 лет [Кудрявцев, 1959]. Высокий научный и практический интерес к этой структуре как возможном источнике углеводородных ресурсов Швеции обусловлен следующими факторами. Во-первых, кольцевая структура Сильян трактуется как результат падения на Землю в позднем девоне (около 360 млн лет назад) болида, сопровождавшегося сильнейшим взрывным ударным воздействием [Svensson, 1971]. Этот процесс не только создал сеть разломов и трещин, послуживших каналами миграции глубинных флюидов в зоне кратера, но и активизировал геодинамическую и гидротермальную деятельность, продолжавшуюся и в последующие за этим геологические эпохи.

На Земле известно 188 подтвержденных импактных кратеров (<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase>) с диаметром от сотен метров до нескольких сотен километров, образовавшихся в результате падения крупных космических тел. Импактные кратеры объединяет между собой морфология рельефа внутри кольцевой структуры, характер нарушения горных пород, наличие обломков, подвергавшихся плавлению при высоком давлении. Типичная черта импактных кратеров — связь с ними месторождений различных полезных ископаемых как сингенетичных, так и эпигенетичных. К числу сингенетичных, образовавшихся при ударе метеоритов, относятся месторождения алмазов, золота, никеля, меди, которые могут достигать достаточно крупных размеров [Koeberl et al., 1997]. К числу эпигенетичных относятся в том числе и месторождения углеводородов. Импактные кратеры, с которыми связаны промышленные месторождения нефти и газа, приведены в таблице [Donofrio, 1988].

Параметры импактных кратеров с промышленными запасами углеводородов

Импактный кратер	Страна	Возраст, млн лет	Диаметр, км
Амес, нефтегазовая залежь в карбонатах и гранитах	США	470 ± 30	12
Авак, газовая залежь в песчаниках	»	3—95	12
Калвин, нефтяная залежь в известняках	»	450 ± 10	8.5
Чиксулуб, нефтегазовая залежь в карбонатах	Мексика	65	180
Маркиз, нефтегазовая залежь в карбонатах и песчаниках	США	58 ± 2	12.7
Ньюпорт, нефтегазовая залежь в карбонатах и песчаниках	»	< 500	3.2
Ред Уинг, нефтегазовая залежь в карбонатах	»	200 ± 25	9
Сьерра Мадера, газовая залежь в карбонатах	м	< 100	13
Стин Ривер нефтегазовая залежь в карбонатах и гранитах	Канада	91 ± 7	25

Углеводороды в импактных кратерах залегают в основном в литологических ловушках или в погребенных выброшенных брекчиях. Вместе с тем в импактном кратере Стин Ривер углеводороды обнаружены в породах докембрийского кристаллического фундамента.

Во-вторых, кристаллические породы магматического и метаморфического генезиса все шире привлекают внимание как возможноеместилище нетрадиционных месторождений нефти и газа в фундаментах или на щитах древних платформ. Наряду с многочисленными промышленными притоками нефти и газа из кристаллического фундамента осадочных бассейнов известны крупные месторождения нефти в гранитных массивах шельфовой зоны Южного Вьетнама (месторождения Белый Тигр, Дракон, Рангдонг, Руби и др.). Проявления нефти, газа, твердых битумов встречаются на кристаллических щитах древних платформ на всех континентах. Это свидетельствует о наличии в недрах Земли вне пределов осадочных бассейнов современных углеводородных потоков. Все это делает постановку вопроса о поисках углеводородных скоплений на щитах вполне оправданной.

В настоящей работе рассмотрены подходы к методологии таких поисков на примере изучения импактного кратера Сильян.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные нефтегазопроисковые технологии, основу которых составляет выявление ловушек для углеводородов сейсморазведочными методами, мало подходят для поисков нетрадиционных месторождений нефти и газа. А для поисков углеводородных скоплений в кристаллических породах традиционные методы вообще неприменимы. Альтернативный подход к обнаружению нетрадиционных месторождений нацелен на поиски каналов миграции глубинных углеводородных флюидов к земной поверхности. При этом необходимо выявлять современные активные, неотектонические каналы, не приводящие к разгрузке флюидов на поверхность Земли и в атмосферу. Далее в окрестностях таких каналов надо находить природные резервуары — линзы разуплотненных пористо-проницаемых горных пород, в которых возможно обнаружить скопление углеводородов.

Концепция поисков современных каналов миграции углеводородных флюидов основана на моделировании блоковой структуры земной коры. Иерархический уровень границ геоблоков контролирует тектонические разломы разной глубины заложения. Самые благоприятные участки для миграции глубинного флюида в верхние части литосферы находятся на пересечениях границ блоков — дизъюнктивных узлах. В области последних происходят крупные и мелкие подвижки земной коры, способствующие трещинообразованию и повышенной флюидопроводимости.

Моделирование современной блоковой структуры литосферы осуществлялось методом многоцелевого морфоструктурного районирования, разработанного Е.Я. Ранцман и М.П. Гласко. Методика моделирования описана в работах [Gel'fand et al., 1976; Alekseevskaya et al., 1977; Ранцман, Гласко, 2004]. Концепция районирования основана на связи основных черт рельефа земной поверхности и природной дренажной сети с неотектоническими движениями земной коры. Блоки выделяются как однородные в морфоструктурном отношении участки земной поверхности. На границах соседних блоков и в дизъюнктивных узлах изменяются информативные признаки рельефа и речной сети, нарушается однородность ландшафта в целом.

Ключевые элементы районирования — это блоки разного иерархического уровня (*ранга*), представляющие собой наиболее стабильные участки блоковой структуры территории. Границы между блоками (*морфоструктурные линейменты*) — это более мобильные относительно блоков зоны. Ранги границ отвечают иерархическому уровню блоков. Места стыковки границ нескольких блоков разной иерархии (*морфоструктурные узлы*) являются наиболее активными элементами блоковой структуры и представляют собой некоторые раздробленные области вокруг пересечений границ блоков. Морфо-

структурные узлы интерпретируются как активизированные в новейшую и современную геологические эпохи тектонические дизъюнктивные узлы. Все части морфоструктурной модели блоковой структуры представляют собой элементы единой иерархической системы и не могут интерпретироваться независимо. Морфоструктурная блоковая модель отражает глубинное строение и геодинамику осадочных бассейнов, влияющую на миграцию углеводородов и формирование их скоплений.

В результате моделирования современной блоковой структуры нефтегазоносных бассейнов разных регионов мира установлена связь самых крупных в нефтегазоносном бассейне традиционных месторождений нефти и газа с морфоструктурными узлами, обладающими набором особых признаков перспективных узлов [Губерман и др., 1986; Guberman et al., 1997].

В кристаллических породах каналы миграции углеводородов наиболее вероятны в мелкоблоковых участках на периферии кольцевых морфоструктур. Геохимические исследования позволяют уточнить наличие фактов миграции флюидов и характер мигрирующего вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ КРАТЕРА СИЛЬЯН

На мелкомасштабной (1:1 000 000) карте морфоструктурного районирования Центральной Швеции видно, что кратер Сильян принадлежит крупному кольцевому морфоструктурному узлу, образованному схождением морфоструктурных линейментов — границ крупных мегаблоков земной коры, отражающих элементы глубинных разломов (рис. 1).

Морфоструктурный узел представляет собой кольцевую структуру центрального типа с границей 2-го ранга. Диаметр структуры значительно превосходит диаметр кратера и составляет более 100 км. Внутренняя структура узла состоит из системы концентрических и радиальных зон 3-го ранга. Центральная из этих зон соответствует собственно кратеру Сильян. Территории между зонами имеют свои особенности рельефа, рисунка речной сети, простирания и линейных эрозионных элементов рельефа и блоковой структуры.

Сам кратер представляет собой хорошо выраженную в рельефе крупную кольцевую структуру взрывного типа диаметром около 50 км. В центре этой кольцевой структуры среди вулканических и метаморфических пород находится древний гранитный массив, пронизанный интрузиями долеритов. Обрамление кратера представляет собой кольцевую депрессию, занятую озерной системой. Днище кратера со средней высотой над уровнем моря 134 м характеризуется сложным рельефом, неоднократно подвергавшимся воздействию ледников. Большая часть территории днища кратера занята возвышенной равниной с высотами до 400 м, сильно расчлененной эрозионной системой на увалы, гряды и холмы преимущественно северо-западного простирания. В центральной части кратера расположена многочисленная группа мелких озер. Окружающая кратер территория характеризуется ледниковым интенсивно эродированным рельефом с падением высот от 1700 м к Балтийскому морю. Вокруг кратера на поверхность выходят нижнепалеозойские осадочные отложения,

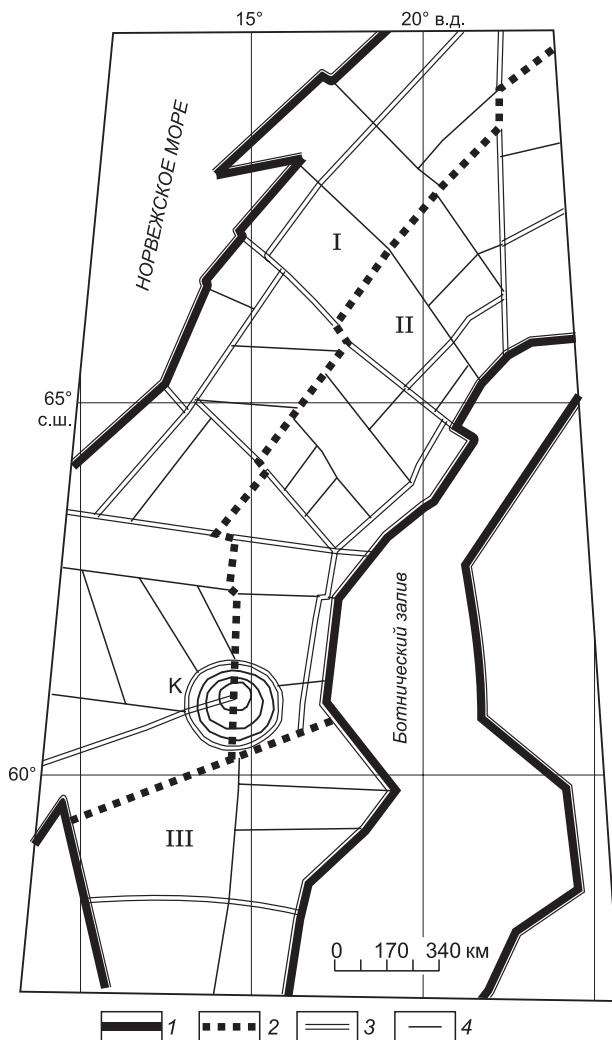


Рис. 1. Положение кратера Сильян в современной блоковой структуре Скандинавского полуострова.

Границы морфоструктурных блоков (морфоструктурные линейменты): 1 — Скандинавского полуострова (надранговая), 2 — макроблоков (1-й ранг), 3 — мезоблоков (2-й ранг), 4 — блоков (3-й ранг). Морфоструктурные макроблоки: I — Скандинавские горы; II — плато Норрланд; III — Среднешведская низменность и плато Смоланд. К — кольцевая структура Сильян.

большей частью брекчированные, — силурийские известняки и аргиллиты, ордовикские конгломераты, песчаники, алевролиты, аргиллиты и известняки. Мощность осадочных пород, имеющих ограниченное площадное распространение, составляет не более 350 м. Геологическая позиция кратера дает хорошую возможность изучить современную глубинную углеводородную дегазацию Земли.

Морфоструктурное районирование кратера Сильян и прилегающей территории, проведенное в более крупном масштабе (1:100 000), позволило выделить в его пределах морфоструктурные блоки разных рангов и их ограничения — морфоструктурные зоны и линейаменты (рис. 2).



Рис. 2. Современная блоковая структура импактного кратера Сильян (фрагмент кольцевой структуры).

Морфоструктурные границы внутренних блоков территории кратера: 1 — зона депрессии (граница кратера 3-го ранга), 2 — продольные границы 4-го ранга, 3 — поперечные границы 4-го ранга, 4 — границы мелких блоков 5-го ранга, 5 — пробуренные скважины: глубокие — Gravberg-1, Stenberg-1; 1—6 — гидрогеологические: 1—4 — с выходами углеводородного газа, 6 — с выходами нефти.

В центре блоковой структуры кратера находится крупный центральный блок 3-го ранга диаметром 32—34 км, представляющий собой гранитный массив. Он разделяется на пять блоков 4-го ранга, границами которых служат два поперечных субмеридиональных линеамента и один линеамент ю.в.-с.з. простирания. Эти блоки разбиты на множество блоков 5-го ранга.

Границей центрального блока кратера служит концентрическая депрессия, занятая на большом протяжении озерами. Ширина депрессии изменяется от 10 км на юго-западе до 4.5 км на востоке. В пределах депрессии залегают остатки осадочных пород ордовикского и силурийского возрастов, имеющих мощность до 200—350 м. Ширина их выходов от 9—10 км на западе структуры до 5—7 км на востоке. Зона депрессии разбита на мелкие блоки поперечными и продольными морфоструктурными линеamentами 5-го ранга.

На расстоянии 4—7 км от внешней границы кольцевой зоны 3-го ранга проходит обрамляющая ее кольцевая граница 4-го ранга, ограничивающая зону, в которую входит система небольших блоков 4-го и 5-го рангов. Пересекая эту границу, к кольцевой депрессии 3-го ранга с разных направлений подходят поперечные линеamentы 4-го ранга, разделяющие соответствующие по иерархии блоки.

Обращает внимание следующая особенность структуры: от ее периферии к центру — к кратеру Сильян — на фоне снижения рельефа увеличивается плотность радиальных зон низкого ранга и блоковая раздробленность.

Установлена «автономность» современной блоковой структуры кратера Сильян. В отличие от окружающего вала, отсутствует подчиненность структуры радиально-концентрическим зонам — здесь преобладают зоны северо-западной ориентации, при этом прослеживается и вышеупомянутая меридиональная зона, концентрические зоны единичны. Ориентация границ блоков разного ранга на территории кратера Сильян в основном совпадает с ориентацией разломов на геологической карте.

Стыки границ блоков (пересечения линеamentов) выделяются как особый элемент современной блоковой структуры — малые внутренние морфоструктурные узлы являются отражением на поверхности наиболее проницаемых для флюидов субвертикальных зон земной коры и зон высоких тектонических напряжений. Внутренние морфоструктурные узлы в этой структуре можно рассматривать как флюидопроводящие зоны, по которым углеводороды могут подниматься в верхнюю часть кристаллического массива и скапливаться в трещиноватых линзах.

ПРОЯВЛЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА В КРАТЕРЕ СИЛЬЯН

В центральном блоке кратера были пробурены две глубокие скважины, которые прошли по гранитам на глубину примерно 6900 м каждая. Первая скв. Gravberg-1 была пробурена в северо-восточной части кратера в 1986—1990 гг. на глубину 6957 м, вторая (Stenberg-1) — пробурена в 1991—1992 гг. в самом центре кратера на глубину около 6900 м. Обе скважины прошли по гранит-порфирам, пересеченным силлами долеритов. В скважинах были отмечены незначительные проявления углеводородного газа как свободного, так и сорбированного гранитами и долеритами. В долеритах количество газов увеличивалось. Судя по стабильным изотопам углерода (^{13}C от -20 до -35 ‰ при бурении и ^{13}C от -42 до -56 ‰ при испытании) газ по происхождению abiогенный. В составе газа было 50—70 % метана. Соотношение метан/этан изменялось в пределах 8—10 [Castaño, 1993]. В скв. Gravberg-1 во время подъема инструмента при забое 5945 м был поднят черный асфальтоподобный материал с магнетитом (60 кг). В интерпретации его происхождения эксперты разошлись, но большинство склонилось к его техногенному характеру [Jeffrey, Kaplan, 1989].

В настоящее время выходы нефти в известняках наблюдаются в восточной части депрессии в известняковом карьере Сольберг (Solberg). Нефть всплывает над водой в неглубоких скважинах. В виде натеков она видна на стенках карьера (рис. 3). Плотность нефти составляет 860 кг/м^3 . Без разделения на фракции в нефти хорошо идентифицируются антрацен, пирен, тетрафен, бензо(ghi)перилен.

В юго-западной части кратера, в окрестностях г. Мура, в скважинах по периферии гранитного массива в пределах окаймляющей его мелкоблоковой депрессии, в зоне локального растяжения земной коры было зафиксировано насыщение воды горючим газом (до 90—94 % метана), который при атмосферном давлении выделяется в свободное состояние. Проявления углеводородов в этой структуре были отмечены в неглубоких (до 500 м) скважинах.

Анализ газов, отобранных из скважин, пробуренных в юго-западной части кратера глубиной до 500 м, показал, что встречаются два типа состава свободного газа: углеводородный (90—94 % метана; 0.0002 % тяжелых углеводородов; 6—9 % азота; 0.01—0.02 % гелия) и азотно-углеводородный (45—65 % метана; 0.001—0.12 % тяжелых углеводородов; 34—44 % азота, 0.5—0.8 % гелия). В пробах газов, отобранных в почвах (за вычетом воздуха), преобладает азот (больше 98 %). Кроме того, есть метан до 1.5 %, тяжелые углеводороды до 0.001 % и гелий до 0.01 %.

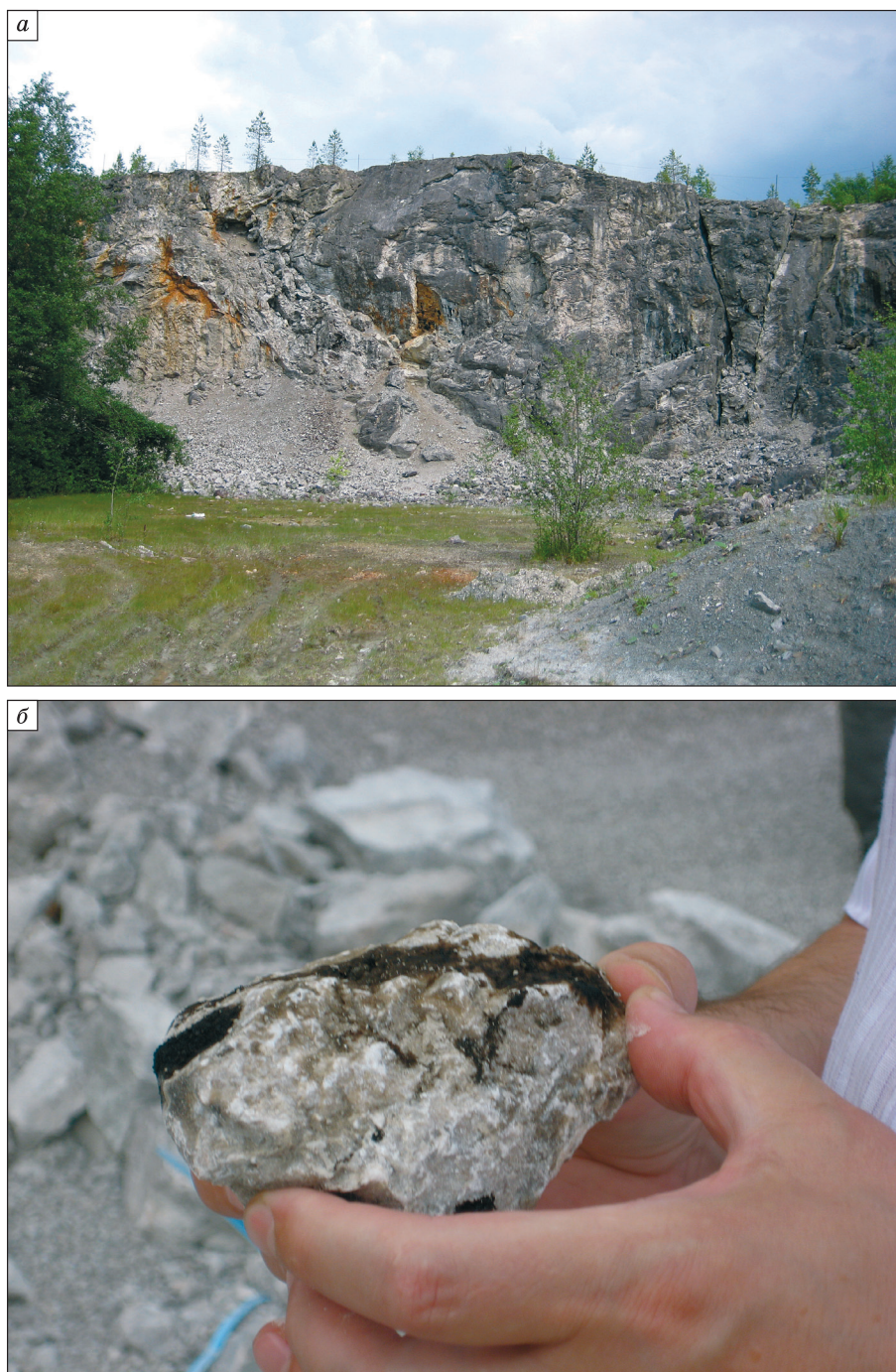


Рис. 3. Нефтепроявления в известняковом карьере Сольберг в восточной части кратера Сильян.

а — нефтепроявления в стенке карьера; *б* — образец с трещиной, заполненной вязким битумом.

В работе [Castaño, 1993] отмечаются две группы углеводородных газов на территории кратера: в центре следовые проявления метана с легким изотопом углерода (^{13}C -60 ‰) и в восточной части, в районе нефтепроявлений, выходы метана с тяжелым изотопом углерода (^{13}C -45 ‰).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первая попытка поиска скоплений углеводородов в недрах кратера Сильян (проект «Gas Deer Exploration Project») не увенчалась успехом. Две глубокие скважины в кратере, пробуренные в 1980—

1990-х годах, не дали желаемых результатов, так как закладывались в центре гранитного массива в пределах стабильного геоблока, не имеющего хороших флюидопроводящих каналов, т. е. без учета блоковой структуры этого объекта и условий выходов углеводородов на поверхность.

Наше исследование позволило установить, что кратер Сильян находится в центре морфоструктурного узла, образованного схождением границ трех крупных мегаблоков Скандинавского кристаллического щита. Сам морфоструктурный узел представляет собой кольцевую структуру диаметром свыше 100 км, состоящую из мелких морфоструктурных блоков, разделенных концентрическими границами. Циркулирующие в этом узле глубинные флюиды могли сформировать различные рудные и нерудные полезные ископаемые, включая углеводородные скопления.

С применением метода морфоструктурного районирования установлено, что блоковая структура самого кратера Сильян состоит из стабильного центрального блока, представленного гранитным массивом, и окаймляющей его кольцевой границей, образующей широкую мелкоблоковую зону депрессии, большая часть которой на поверхности занята озерами. Это наиболее подвижная и предположительно более проницаемая по сравнению с соседними блоками зона шириной в несколько километров. На юго-западе этой зоны, в наиболее широкой ее части, выявлены потоки углеводородных газов. В наиболее узкой восточной части известны проявления нефти. Возможно, участки изменения ширины зоны отражают процессы тектонического расширения и сжатия земной коры, влияющие на миграцию и геохимию флюидов в ее глубинах. Именно эта депрессионная флюидопроводящая зона может считаться наиболее перспективной для поисков скоплений углеводородов. Конкретные объекты для поискового бурения должны выбираться с учетом петрофизических свойств горных пород и геохимических признаков на поверхности.

Таким образом, в современной тектонической блоковой структуре кратера Сильян проявляются флюидопроводящие каналы, по которым углеводороды могут подняться в верхнюю часть кристаллического массива и скопиться в разуплотненных пористо-проницаемых линзах.

ЛИТЕРАТУРА

Губерман Ш.А., Жидков М.П., Пиковский Ю.И., Ранцман Е.Я. О некоторых критериях нефтегазоносности морфоструктурных узлов (Анды Южной Америки) // Докл. АН СССР, 1986, т. 291, № 6, с. 1436—1440.

Кудрявцев Н.А. Нефть, газ и твердые битумы в изверженных и метаморфических породах. Л., ВНИГРИ, 1959, 278 с. (Тр. ВНИГРИ, вып. 142).

Ранцман Е.Я., Гласко М.П. Морфоструктурные узлы — места экстремальных природных явлений. М., Медиа-ПРЕСС, 2004, 224 с.

Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gel'fand I., Gvishiani A., Rantsman E. Formal morphostructural zoning of mountain territories // J. Geophys., 1977, v. 43, p. 227—233.

Castañó J.R. Prospects for commercial abiogenic gas production: implications from the Siljan Ring area, Sweden // The future of energy gases. U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, Washington, 1993, p. 133—154.

Donofrio R.R. North American impact structures hold giant field potential // Oil Gas J., 1998, № 11, p. 69—81.

Gel'fand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Rantsman E.Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M. Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // Phys. Earth Planet. Int., 1976, № 11, p. 227—283.

Guberman S., Pikovskiy Y., Rantsman E. Methodology for prediction of the locations of giant oil and gas reservoirs: field results // SPE, Western Regional Meeting held in Long Beach, California, 25—27 June 1997. SP, 1997, p. 321—330.

Jeffrey A., Kaplan I. Asphaltene-like material in Siljan Ring well suggests mineralized altered drilling fluid // J. Petrol. Technol., 1989, v. 41, № 12, p. 1262—1263.

Koeberl C., Masaitis V.L., Shafranovsky G.I., Gilmour I., Langenhorst F., Schrauder M. Diamonds from the Popigai impact structure, Russia // Geology, 1997, v. 25, № 11, p. 967—970.

Svensson N.B. Probable meteorite impact crater in Central Sweden // Nat. Phys. Sci., 1971, v. 229, p. 90—92.