

СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОАМПЛИТУДНЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ, ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ

Д.М. Трофимов¹, А.И. Захаров², М.К. Шуваева¹

(ООО "РЕСЕНОЙЛ"¹, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН²)

Наука и следующая за ней техника открывают новые возможности многоаспектного и разновременного изучения современной жизни Земли. Возможности ее пространственного и временного изучения обусловлены появлением в конце прошлого века нового вида дистанционного зондирования – радиолокационной съемки из космоса. Она открыла перспективы решения ряда научных и прикладных геологических вопросов, в частности изучения современных микроамплитудных тектонических движений, активности структурных элементов земной коры, глубинных разломов, в том числе и оценки экологической безопасности нынешней инфраструктуры. Это значит, что геологи могут перейти к изучению нового класса величин подвижности разнорядковых структур чехла и их изменению во времени.

Впервые термин "микроамплитудные тектонические движения" предложен в 2005 г. польскими геологами в Силезии при изучении современных смещений с помощью радиолокационной интерферометрии [1].

Статья посвящена микроамплитудной тектонике локальных структур и разрывных нарушений нефтегазоносных регионов. Она представляет практический интерес в связи с систематической недоразведанностью месторождений нефти и газа, что приводит, с одной стороны, к пониженному коэффициенту извлечения углеводородов, а с другой – повышению затратности геолого-разведочных работ на нефть и газ. Это объясняется тем, что геофизические методы поисков испытывают определенные ограничения своих амплитудных разрешающих возможностей на уровне десятка метров.

Под современными микроамплитудными движениями понимаются смещения земной поверхности с амплитудой от первых миллиметров до сантиметров в год. Они качественно и количественно регистрируются техническими средствами за выбираемые интервалы времени (годы, месяцы и др.), что позволяет определять периодичность и направленность их проявления, т. е. проводить мониторинг. Оценка микроамплитудных подвижек структур земной коры связана с появлением новых, высокоточных методов измерений, недоступных для существующих геофизических методов.

Необходимо подчеркнуть, что проблема микроамплитудных движений является сложной в реализации и зависит от конкретного учета ряда факторов (разрешающей способности радиолокационных снимков, положения спутников, специфики рельефа местности, маскирующей его растительности, интервалами между съемками и др.), а также высокой квалификации специалистов.

В первую очередь, необходимо показать обоснованность и точность данных, получаемых с помощью радиолокационных съемок. Прямые оценки точности измерений подвижек земной поверхности можно получить непосредственно по интерферограммам, отражающим деформационные смещения рассматриваемых объектов за некоторый период времени. Эта задача решается путем анализа флуктуаций разности фаз на дифференциальной интерферограмме (после устранения топографической компоненты фаз) для заведомо стабильного типового участка поверхности. В зависимости от степени усреднения данных на интерферограммах, а также уровня шумов различной природы, точность измерений смещений земной поверхности за время между съемками интерферометрической пары может достигать долей сантиметра – первых сантиметров.

В прошлом веке для изучения новейших и современных движений в основном использовались два метода: гидрографический по морским побережьям и геолого-геоморфологический. Последний в настоящее время потерял свою актуальность в связи со скорее качественным, чем количественным измерением вертикальных тектонических движений за неопределенный период времени. Он в большей степени соотносится с рельефообразующим этапом развития, который может быть больше или меньше собственно неотектонического этапа, в том числе в различных регионах.

До появления новой дистанционной техники такие измерения проводились в основном с помощью повторного высокоточного нивелирования и предназначались для региональной и реже локальной оценки подвижности поверхности Земли, структур земной коры и составляющих их элементов. По результатам этих работ были определены средние скорости вертикальных положительных и отрицательных тектонических движений порядка первых сантиметров в год.

Наиболее интересный конкретный результат, полученный Ю.О. Кузьминым с помощью нивелирования, заключался в изучении разрывных нарушений, пересекаемых одиночными профилями. Он позволил определить ряд параметров современной активности нарушений [2, 3]:

- пульсационный и знакопеременный характер;
- короткопериодные смещения со скоростями от первых десятков миллиметров в год до максимум 50 мм/год.

Эти работы трудо- и времяёмкие, дорогостоящие и не обеспечивают полноценного представления о характере, направленности и периодичности тектонических

движений на больших площадях вследствие дискретности измерений по сети нивелировочных профилей.

Исходя из этого, состояние традиционных представлений о современных движениях является неопределенным, неоднозначным и подчас противоречивым по следующим причинам. Во-первых, по-разному исчисляется их временной диапазон вследствие неясности вопроса нижней границы отсчетов времени. Во-вторых, ряд специалистов объединяет новейшие и современные движения. В-третьих, для сравнительного анализа оценки времени и периодов новейшей тектонической активизации в пределах различных региональных структур отсутствуют единые одновременные реперы.

До тех пор пока не будет перехода к площадным измерениям, осуществляемым только дистанционными методами, проблема современных движений, их временной и пространственной дифференциации остается открытой. Необходимость количественных измерений определяется задачами, требующими информации в реальном масштабе времени. Частным примером являются синхронизация разработки месторождений углеводородов и мониторинг подвижности земной поверхности, отражающей техногенную и тектогенную активность резервуаров.

В условиях тотального увлечения горизонтальными движениями в связи с "тектоникой плит" по вертикальной составляющей у нас имеются только общие данные в рамках геодинамических исследований. Однако последние представляют большой интерес для нефтегазовой геологии [3], так как влияют на термодинамический режим осадочного чехла, резервуаров и, соответственно, на массоперенос, с которым связаны перемещение и распределение углеводородов.

Исследования современных движений на основе новых космических технологий начались с геодезических измерений фигуры геоида и его уточнения. По данным НАСА радиус Земли увеличивается за год на 1 см [4]. Эта информация в первую очередь была использована для решения глобальных задач плитной тектоники – оценки скорости горизонтальных смещений плит и крупнейших разломов земной коры: Сан-Анדרс, Северо-Анатолийский и др., составляющих около 3 см/год.

Для решения рассматриваемой проблемы в последнее десятилетие появились и модернизировались применительно к решению прикладных задач три новых метода: лазерная дистанционная съемка, GPS-измерения и радиолокационная съемка из космоса. Рассмотрим кратко их основные показатели для сравнительной оценки.

Лазерная аэросъемка является трудо-, время- и затратноёмкой, требует подготовки для формирования необходимой топографической базы данных. Она характеризуется очень высокой точностью, но является единовременной или требует многократных повторений с кратным увеличением стоимости работ. На ее основе обеспечивается построение трехмерных изображений рельефа местности.

GPS-измерения являются дискретными, так как используются наземные приемные станции, которые для

получения пространственных данных требуют их значительных перемещений. Этот метод также нуждается в определенном объеме подготовительных топографических работ, но является относительно малозатратным. Основным положительным показателем этого метода являются высокая точность измерений вертикальных и горизонтальных движений на уровне первых сантиметров и возможность периодических замеров в режиме мониторинга по отдельным точкам или вдоль профилей. Показательным примером являются исследования А.А. Панжина, подтвердившего данные о периодичности, направленности и знакопеременности тектонических движений по разрывным нарушениям, полученным высокоточными геодезическими методами [2, 5].

Радиолокационная съемка с интерферометрической обработкой, являясь малозатратной и высокооперативной, обеспечивает получение многомоментной плановой съемки с точностью измерений тектогенных и техногенных амплитуд смещений земной поверхности до миллиметров–сантиметров в год в заданные интервалы времени. Для изучения техногенных движений, в частности над разрабатываемыми нефтяными и газовыми месторождениями, помимо сейсмических исследований, радиолокационная интерферометрия используется не менее 15 лет зарубежными и российскими специалистами [6–9]. Однако возможности ее существенно шире, в том числе в области изучения современной микроамплитудной тектоники нефтегазоперспективных и нефтегазоносных объектов [10–13].

То есть этот вид съемки является уникальным инструментом для мониторинга различных природных явлений и позволяет охватывать большие площади для решения региональных и локальных нефтегазогеологических задач практически в любой части Земли. Накопленный архив радиолокационных съемок с конца прошлого века с разных спутников позволяет изучать современные движения. С учетом этого представляется возможным осуществлять построение 4D моделей для современных подвижек структур земной коры, однако описанные инструментальные методы крайне слабо используются в практике работ.

В качестве примера рассмотрим результаты практического использования радиолокационной интерферометрии на подземном газовом хранилище (ПХГ) Карадаг на Апшеронском полуострове [10]. Зарегистрированные тектогенные и техногенные движения мало- или микроамплитудны и знакопеременны. То есть структурные элементы, установленные этим видом съемки в пределах детально изученной ловушки, остаются за пределами возможностей современной геофизики.

При постановке дистанционных работ ставилась суперзадача – дать прогноз структуры резервуара литолого-стратиграфической ловушки, находящейся на глубинах 3,0...3,5 км. После отработки содержащихся в ней залежей углеводородов она была использована в качестве подземного хранилища газа. Проблема его изучения заключалась в том, что отработанный объем резервуара не вмещал закачиваемый газ. Это позволило предположить, что в нем сформировались барьеры,

препятствующие закачкам газа. Их положение нельзя было установить традиционными методами. Сейсморазведкой по методике 3D на рассматриваемом объекте были выявлены три продольных к его простиранию разрывных нарушения, а дистанционными методами они были частично подтверждены и выявлена система субпараллельных поперечных дислокаций. Последние были установлены литолого-фациальным анализом и специализированной переинтерпретацией сейсморазведочных данных. Таким образом, резервуар представлял собой блоковую структуру, которая нашла отражение на интерферограмме (рис. 1). Цветом условно показаны их амплитуды для каждого периода съемок на уровне 2...3 мм. Использовались съемки за пятилетний период с 2007 по 2011 г. с полугодовым диапазоном, соответствующим отбору и закачкам газа.

На фоне подвижности разрывных нарушений и блоков в пределах ПХГ, активизированных техногенными причинами, анализировалась и окружающая его территория. Для разных блоков отмечались три основных режима вертикальных тектонических движений: опускания, воздымания и стабилизации. Только на общем фоне регионального поднятия внутренняя структура ПХГ проявилась слабее или не фиксировалась, так как смена регионального тектонического режима со стабильного на поднятие была зафиксирована при отборе и закачках газа в середине 2010 г. (см. рис. 1, в).

Воздействие техногенных движений на резервуар наглядно отражается на интерферограммах. При отборе газа растет площадь просадок, вписывающихся в блоковую структуру резервуара (см. рис. 1, б), а при закачках газа возрастает площадь стабильности и появляются воздымающиеся фрагменты блоков (см. рис. 1, г). Необходимо подчеркнуть, что тенденция к просадкам отмечается в пределах резервуара.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что метод радиолокационной интерферометрии, помимо широко известной регистрации просадочных смещений над разрабатываемыми месторождениями [6, 8], способен выявлять малозаметную даже для сейсморазведки 3D детальную структуру резервуара на фоне региональных тектонических движений.

Доказательства существующей современно-активной сетки нарушений были получены по результатам геохимической съемки [10]. Вдоль них, являющихся сквозными каналами, установлены превышенные над уровнем фона содержания газа. Часть нарушений были залечены [10]. Именно они представляли собой разнопроницаемые барьеры, изолирующие части резервуара с застойными зонами и препятствующие его заполнению.

Для большей подтверждаемости микроамплитудных движений, помимо эксплуатируемых объектов, изучались выявленные локальные поднятия, не подвергавшиеся техногенному воздействию и отражающие чисто тектонические проявления. На рис. 2 по Непско-Ботубинской антеклизе Восточной Сибири видно:

1. В одном случае локальное поднятие, четко выраженное в покрывном комплексе юрских отложений

(т. е. на рельефообразующем этапе), отчетливо проявляется в рельефе и испытывает современный подъем около 6 см за интервал времени около двух лет (см. рис. 2). По периферии оно обрамлено широкими зонами опускания (см. рис. 2, г). В тепловом и спектральном полях поднятие находит четкое отображение, что свидетельствует о взаимосвязи данных явлений (рис. 3).

2. В другом случае в цепочке локальных поднятий, ограниченных разрывными нарушениями, одно испытывает подъем, а другое, находясь в ареале опусканий, не проявляет своей индивидуальности (рис. 4). Также регистрируется разнонаправленная современная подвижность крыльев разрывных нарушений.

Различная направленность региональных движений влияет на дифференцированную подвижность локальных поднятий, которые, тем не менее, имеют собственный характер современных перемещений. Вопросы периодичности и скорости разнопорядковых структур находятся еще в начальной стадии исследований. Тем не менее несомненными являются факты постоянного знакопеременного подвижек структурных элементов осадочного чехла на протяжении миллионов лет. Они не могли не оказывать воздействия на термофлюидодинамические процессы формирования и преобразования скоплений нефти и газа.

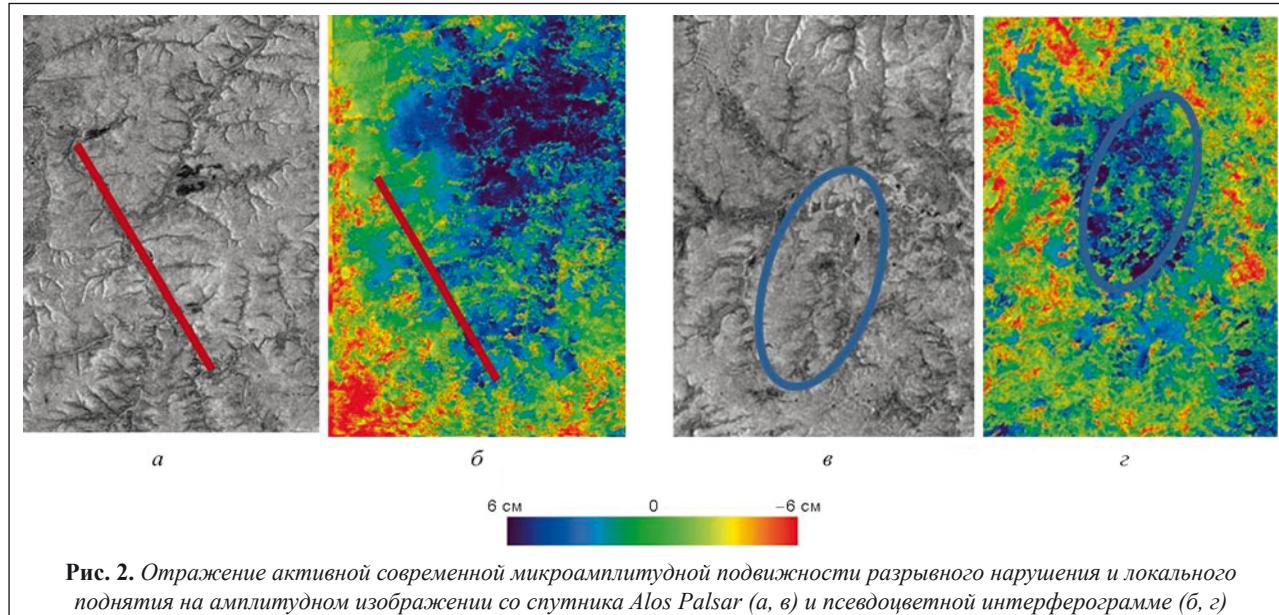
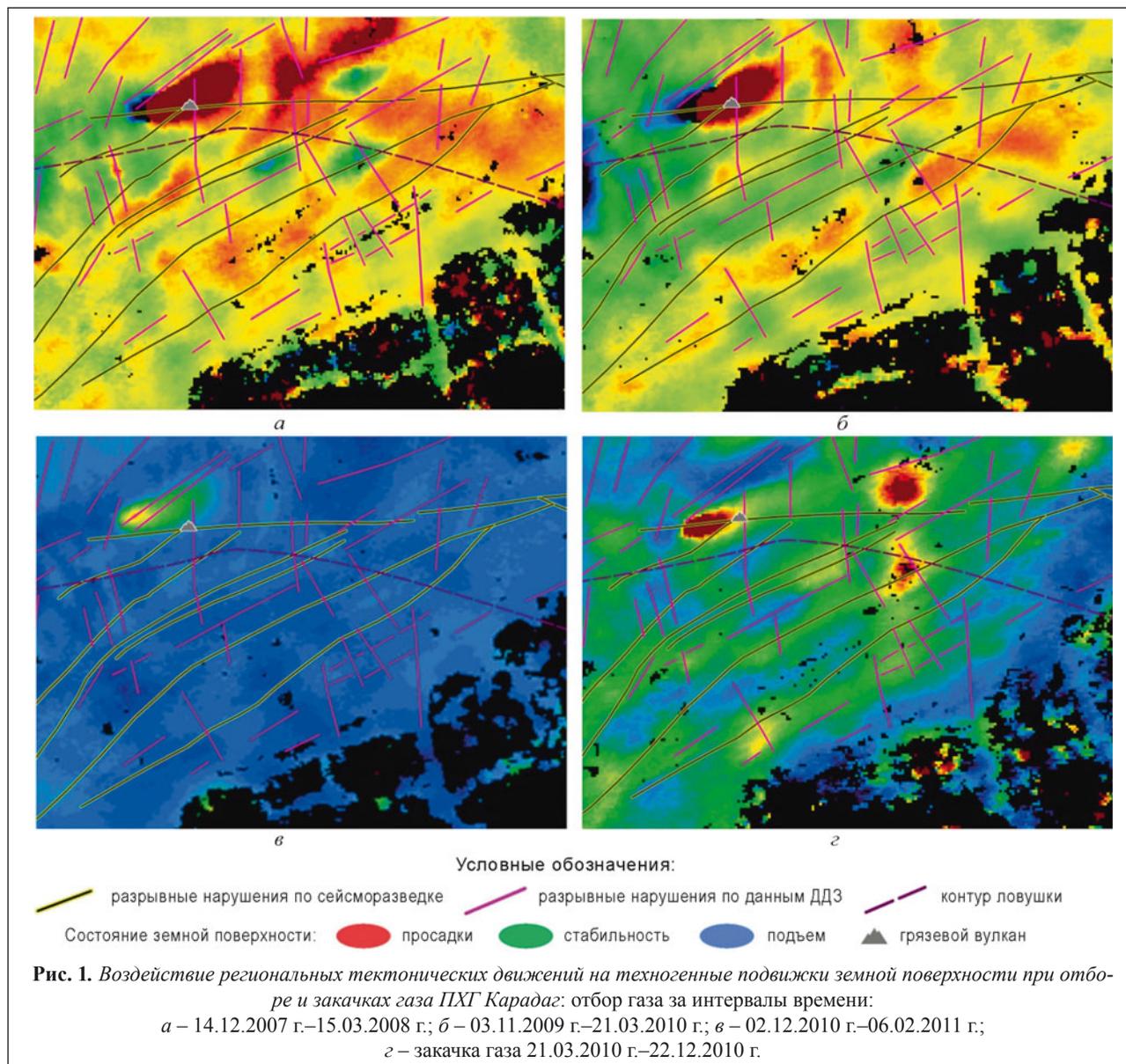
Зоны активизации современных тектонических движений сопровождаются двумя геологическими процессами, регистрируемыми съемками из космоса [14]:

– повышенным тепловым потоком по данным инфракрасного зондирования, связанным с усилением тепломассопереноса (см. рис. 3, а);

– вариациями спектральных показателей почвенно-растительного покрова, отражающими аномальные миграционно-геохимические проявления углеводородов (см. рис. 3, б).

Эти измеряемые в настоящее время даже локальные явления отражают единые термофлюидодинамические процессы в осадочном чехле. До появления высокоразрешающих съемок из космоса они не могли быть комплексно изучены.

Полученные результаты представляют большой интерес как для поисков месторождений нефти и газа, так и для разработки. С точки зрения поисковых работ представляется возможным выявление уточненного современного структурного плана ловушек, сформированных на палеотектонической стадии развития, деформированных за рельефообразующий этап и активизированных в настоящее время. Он может быть установлен только дистанционными методами в связи с их высокой пространственной и спектральной разрешающей способностью. Эту информацию необходимо учитывать при заложении первых поисковых скважин. Регистрация современно-активных сквозных разрывных нарушений в пределах опосредованного поднятия при решении данной задачи позволяет надежнее оценивать его перспективы нефтегазоносности. Этот тип нарушений является прямым каналом связи между продуктивными горизонтами и земной поверхностью. Современные многоспектральные и тепловые инфракрас-



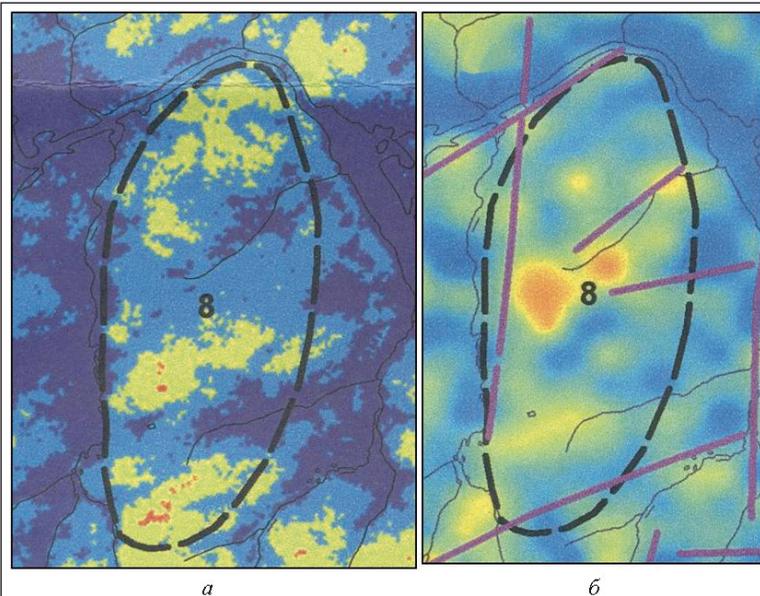


Рис. 3. Отражение активного локального поднятия в тепловом (а) и спектральном (б) полях. Аномалии теплового и спектрального полей показаны в жёлто-оранжевой гамме

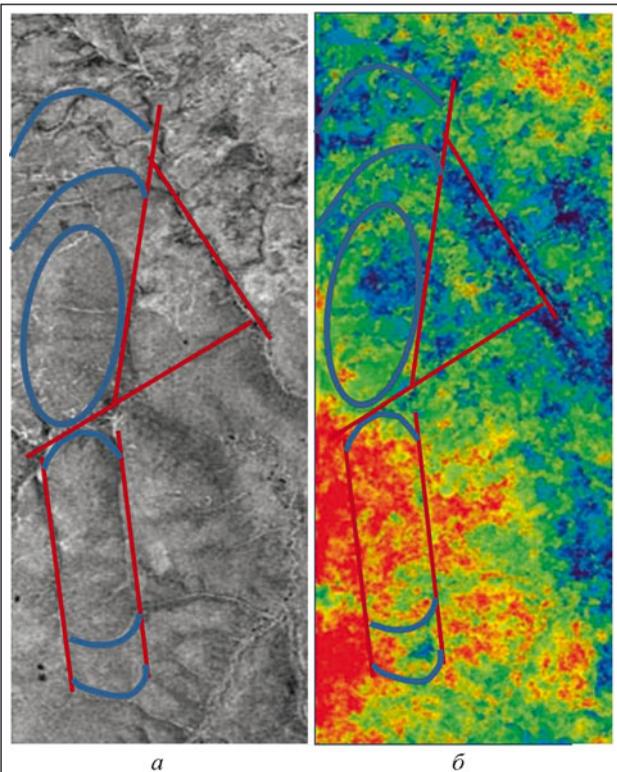


Рис. 4. Отражение различной современной подвижности тектонически экранированных ловушек на амплитудном изображении со спутника Alos Palsar (а) и псевдоцветной интерферограмме (б)

ные, а также геохимические методы оперативно и с небольшими затратами дают возможность определить наличие нефти или газа во вводимой в поисковое бурение ловушке [11, 12].

Выявление современно-активных разрывных нарушений представляет интерес для разведываемых или подготавливаемых к разработке месторождений угле-

водородов, так как они не всегда фиксируются геологической съемкой и сейсморазведкой, с учетом многообразия их проявления на рельефообразующем и современном этапах.

С подобными нарушениями пространственно часто связаны "каналы" или "барьеры" в резервуарах [10, 13]. Синхронное проведение дистанционных и геолого-промысловых работ на месторождениях представляет возможность проводить мониторинг геодинамических процессов при использовании вторичных методов их разработки, как было показано на примере ПХГ.

Проведенные работы позволяют сделать следующие выводы. Дистанционные методы в комплексе обеспечивают возможность:

- изучать малоизвестное ранее явление современной микроамплитудной тектоники на региональном и локальном уровнях с высокой точностью и в заданные интервалы времени с целью оценки динамического и напряженного состояния недр;
- с помощью комплекса спектрометрических, тепловых инфракрасных и геохимических методов исследований выявлять современно-активные разрывные нарушения в пределах локальных поднятий для установления углеводородной специализации и перспектив их нефтегазоносности;
- устанавливать современную подвижность структурных элементов ловушек, представляющую интерес для геодинамического мониторинга разрабатываемых месторождений нефти и газа. Показанная методика работ на примере ПХГ Карадаг может быть применима как модельная при разработке, особенно при использовании вытесняющих жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Metodik analysis of data obtained by monitoring micro-tectonic movements with TM-71 crack gauges in the Polish Sude-ten / B. Kontny, S. Cacon, B. Kostak, J. Stemberg // *Acta Geo-dyn. Geomater.* – 2005. – Vol. 2. – № 3 (139).
2. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон // *Физика Земли.* – 2004. – № 1.
3. Сидоров В.А., Багдасарова М.В. Геодинамика и нефтегазоносность. – М.: Наука, 1989.
4. Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. – М.: Мир, 1991.
5. Панжин А.А. Экспериментальные исследования динамики смещений в разломных зонах. – ИГД УРО РАН, 2002.
6. Fielding E.I., Blom R.G., Goldstain R.M. Rapid subsidence over fields measured by SAR interferometry // *Geophysical Researche Letter.* – 1998. – Vol. 25.
7. Мори М., Грассо Ж., Витличжер Ж. Газовое месторождение Лак (Франция): контроль за вызванным проседанием и влияние сейсмоактивности на газодобычу. *Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти.* – М.: Мир, 1994.
8. Опыт комплексного мониторинга смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов.

- родов с помощью геофизических и космических методов / Ю.И. Кантемиров, Ю.Б. Баранов, Е.В. Киселевский [и др.] // *Геоматика*. – 2009. – № 1 (2).
9. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли // *Радиолокационное зондирование поверхности*. – М.: Красонд, 2012.
10. Новый инструмент изучения резервуаров подземных газовых хранилищ – радиолокационная интерферометрия / М.Д. Каргер, Д.М. Трофимов [и др.] // *Наука и техника в газовой промышленности*. – 2014. – № 2.
11. Современная активность разрывных нарушений, выявляемых методами космической радиолокационной интерферометрии, и их связь с гелиеносностью Непско-Ботубинской антеклизы / А.Г. Глухов, А.И. Захаров, Е.В. Зубкова [и др.] // В сб. "Оценка углеводородного потенциала юго-восточной части Сибирской платформы с использованием космических методов". – Королев, 2010.
12. Возможности комплексного применения многоспектральных съемок из космоса и наземных геохимических работ при решении нефтегазовых задач / Д.М. Трофимов, Ю.Б. Баранов, А.Г. Глухов [и др.] // В сб. "Оценка углеводородного потенциала юго-восточной части Сибирской платформы с использованием космических методов". – Королев, 2010.
13. Берман Л.Б., Захаров А.И. Вклад космической радиолокационной интерферометрии в изучение резервуаров крупных газовых месторождений Ямала: на примере Ямбургского месторождения // *Земля из космоса*. – 2011. – Вып. 8.
14. Трофимов Д.М., Каргер М.Д., Шуваева М.К. Методы дистанционного зондирования при разведке и разработке месторождений нефти и газа. – М.: Инфра-Инженерия, 2015.

LITERATURA

1. Metodik analysis of data obtained by monitoring micro-tectonic movements with TM-71 crack gauges in the Polish Sude-ten / B. Kontny, S. Cacon, B. Kostak, J. Stemberg // *Acta Geodyn. Geomater.* – 2005. – Vol. 2. – № 3 (139).
2. Kuz'min Yu. O. *Sovremennaya geodinamika razlomnykh zon* // *Fizika Zemli*. – 2004. – № 1.
3. Sidorov V.A., Bagdasarova M.V. *Geodinamika i neftegazonosnost'*. – М.: Nauka, 1989.
4. Keri U. *V poiskakh zakonomernostey razvitiya Zemli i Vselennoy*. – М.: Mir, 1991.
5. Panzhin A.A. *Eksperimental'nye issledovaniya dinamiki smeshcheniy v razlomnykh zonakh*. – IGD URO RAN, 2002.
6. Fielding E.I., Blom R.G., Goldstain R.M. *Rapid subsidence over fields measured by SAR interferometry* // *Geophysical Researche Letter*. – 1998. – Vol. 25.
7. Mori M., Grasso Zh., Vitlichzher Zh. *Gazovoe mestorozhdenie Lak (Frantsiya): kontrol' za vyzvannym prosedaniem i vliyaniye seysmoaktivnosti na gazodobychu. Mekhanika gornyykh porod pri-menitel'no k problemam razvedki i dobychi nefti*. – М.: Mir, 1994.
8. *Opyt kompleksnogo monitoringa smeshcheniy zemnoy poverkhnosti na razrabatyvaemykh mestorozhdeniyakh uglevodorodov s pomoshch'yu geofizicheskikh i kosmicheskikh metodov* / Yu.I. Kantemirov, Yu.B. Baranov, E.V. Kiselevskiy [i dr.] // *Geomatika*. – 2009. – № 1 (2).
9. Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M. *Sputnikovyy monitoring Zemli* // *Radiolokatsionnoye zondirovaniye poverkhnosti*. – М.: Krasond, 2012.
10. *Novyy instrument izucheniya rezervuarov podzemnykh gazovykh khranilishch – radiolokatsionnaya interferometriya* / M.D. Karger, D.M. Trofimov [i dr.] // *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. – 2014. – № 2.
11. *Sovremennaya aktivnost' razryvnykh narusheniy, vyyavlyayemykh metodami kosmicheskoy radiolokatsionnoy interferometrii, i ikh svyaz' s gelienosnost'yu Nepsko-Botuobinskoy anteklizy* / A.G. Glukhov, A.I. Zakharov, E.V. Zubkova [i dr.] // В сб. "Otsenka uglevodorodnogo potentsiala yugo-vostochnoy chasti Sibirskoy platformy s ispol'zovaniem kosmicheskikh metodov". – Korolev, 2010.
12. *Vozmozhnosti kompleksnogo primeneniya mnogospetral'nykh s"emok iz kosmosa i nazemnykh geokhimicheskikh rabot pri reshenii neftegazovykh zadach* / D.M. Trofimov, Yu.B. Baranov, A.G. Glukhov [i dr.] // В сб. "Otsenka uglevodorodnogo potentsiala yugo-vostochnoy chasti Sibirskoy platformy s ispol'zovaniem kosmicheskikh metodov". – Korolev, 2010.
13. Berman L.B., Zakharov A.I. *Vklad kosmicheskoy radiolokatsionnoy interferometrii v izucheniye rezervuarov krupnykh gazovykh mestorozhdeniy Yamala: na primere Yamburgskogo mestorozhdeniya* // *Zemlya iz kosmosa*. – 2011. – Vyp. 8.
14. Trofimov D.M., Karger M.D., Shuvaeva M.K. *Metody distantsionnogo zondirovaniya pri razvedke i razrabotke mestorozhdeniy nefti i gaza*. – М.: Infra-Inzheneriya, 2015.