

УДК 504.064.2.001.5:528.88.04

Методические основы дистанционных аэрокосмических исследований в природопользовании как мульти-междисциплинарное научное направление (на примере оценки нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана)

А. В. Соколовская, А. Д. Федоровский*

ГУ Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

В статье излагаются методические основы дистанционных аэрокосмических исследований в природопользовании, как мульти-междисциплинарного научного направления, использующего знания из разных научных дисциплин на примере нефтегазоперспективных работ в зоне Каспийского шельфа Туркменистана.

Ключевые слова: дистанционные аэрокосмические исследования, природопользование, мульти-междисциплинарность, морской шельф, нефть и газ, геология, гидрология, гидрофизика, геоинформатика, системный анализ

© А. В. Соколовская, А. Д. Федоровский. 2015

Введение

Решения конкретных тематических задач природопользования на основе дистанционных аэрокосмических исследований, как правило, не могут обойтись без привлечения результатов, полученных в разных областях знаний, фактически интегрируя данные из смежных научных дисциплин. Исследования, выполняемые на основе разных научных дисциплин, называют мультидисциплинарными или междисциплинарными научными направлениями. При этом отдельные дисциплины используются как составляющие и дополняющие основное научное направление, с позиций которого, как ведущего, рассматриваются результаты всего комплекса исследований. По сути это системно-интеграционный подход [3].

Отличие мультидисциплинарного подхода от междисциплинарного заключается в том, что в первом все дисциплины используются в рамках своей профессиональной компетенции, тогда как при междисциплинарном подходе происходит перенос теоретической основы одной дисциплины в другую. Так, например, для оптимизации космического геомониторинга путем выбора наилучшего варианта орбитального построения спутниковой группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли была выполнена оценка эффективности множества различных вариантов и выбран оптимальный на основе генетического алгоритма, теоретическая основа которого была заимствована из микробиологии [16]. Под трансдисциплинарным научным направлением в общем смысле понимают способ расширения научного

мировоззрения. Этот термин до сих пор не получил однозначного определения. Одно из них: “принцип организации научного знания, открывающий широкие возможности взаимодействия многих дисциплин при решении комплексных проблем природы и общества” [8].

Для дистанционных аэрокосмических исследований в природопользовании предлагается использовать следующее название и определение: “мульти-междисциплинарное научное направление”, основанное на интеграции теоретических положений, методов и моделей, информационных материалов и экспериментальных данных из разных научных дисциплин.

Анализ известных научных работ, в большинстве своем, прогнозирует развитие и перспективу мульти-междисциплинарных исследований, мотивируя тем, что существенные достижения в науке и технике невозможны без тесной кооперации смежных областей знаний. Эффективность комплексного подхода особенно очевидна, когда необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов, являющихся предметом изучения различных научных дисциплин [3, 8].

Цель данной статьи — обосновать методологию дистанционных аэрокосмических исследований в природопользовании как мульти-междисциплинарное научное направление на примере нефтегазоперспективных работ в зоне Каспийского шельфа.

На основе упомянутых выше работ можно составить перечень методических составляющих, характерных для мульти-междисциплинарного направления. С некоторым обобщением и сокращением сформулируем основные из них: определение проблемы и описание предмета исследований, анализ необходимых областей знаний и научных дисциплин

*e-mail: adfedorovsky@ukr.net, тел.: (044) 486-63-70

лин, организация и привлечение соответствующего профессионального кадрового состава, проведение комплексных исследований, формулировка практических рекомендаций и обеспечение их технологического применения.

Мульти-междисциплинарная научная направленность дистанционных аэрокосмических исследований рассматривается ниже на примере оценки нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана (рис. 1). При этом, кроме авторских исследований, используются материалы анализа геологических структур, полученные при исследовании Каспийского шельфа Туркменистана на нефтегазоперспективность сотрудниками Научного центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины под руководством академика НАН Украины В. И. Лялько и ответственного исполнителя темы А. И. Архипова.

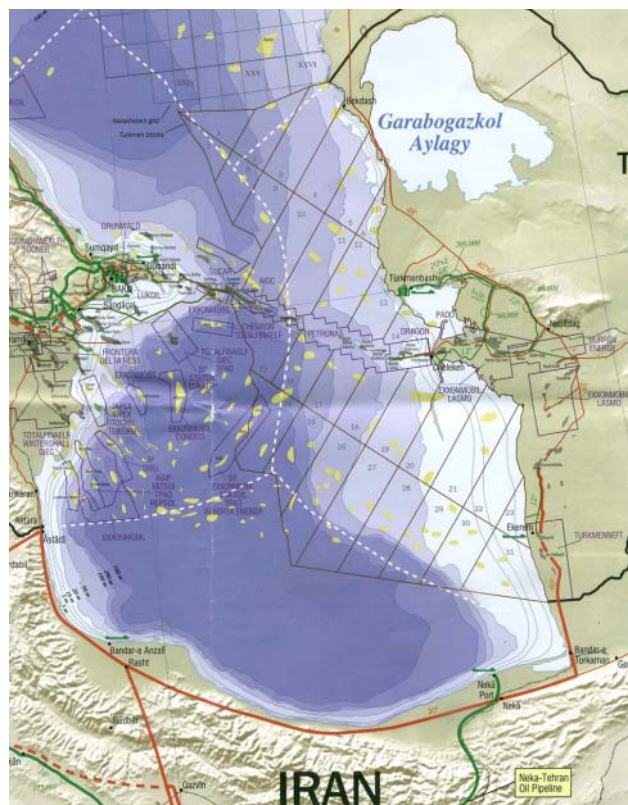
Возможность применения аэрокосмических методов для поиска залежей углеводородов (ЗУ) в шельфовой зоне обусловлена тем, что морская поверхность является естественным интегратором информации, отражающей происходящие в толще воды и донной области процессы. Методология поиска ЗУ на основе дешифрирования космических снимков заключается в том, что решение не может приниматься по одному признаку, а требует многокритериальной оптимизации множества показате-

лей, полученных на основе знаний из разных научных дисциплин: геологии, гидрологии, гидрофизики, картографии, геоиники (теории геоизображений) и системного анализа [7, 12].

На первом этапе в исследуемой акватории Каспийского шельфа на основе батиметрических карт исследуются структурные формы донных ландшафтов, определяются их геоморфологические параметры. Далее определяется тип гидрологии исследуемой акватории, на основе которой проводится анализ приповерхностных гидрофизических процессов и формируется гидрофизическая модель. Для этого по космическим снимкам морской поверхности шельфовой зоны на основе геоиники дешифрируется геоизображение морской поверхности в оптических (видимом и инфракрасном) и радио спектральных диапазонах, в том числе, вычисляются их яркостные и структурно-текстурные признаки. На заключительном этапе, по результатам комплексных исследований: гидрологии, гидрофизики, геоиники, дополняющих основное геологическое направление исследований, на основе методов системного анализа по обобщенному критерию в два этапа (предварительного и детального) выполняется оценка нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа для последующей геофизической разведки.



a



b

Рис. 1. а — космический снимок Modis Каспийского моря; б — карта Каспийского моря с выделенными участками для оценки их нефтегазоперспективности

Геология

Для исследования геологических структур Каспийского шельфа Туркменистана З. М. Товстюк и Т. А. Ефименко были использованы космические снимки MODIS спутника Terra (рис. 2 а) и подробные батиметрические карты морского дна северо-восточной части Каспийского шельфа (рис. 2 б). При этом для выявления геологических структур использовался морфометрический метод (один из методов структурно-геоморфологических исследований), который базируется на картометрических трансформациях [17].

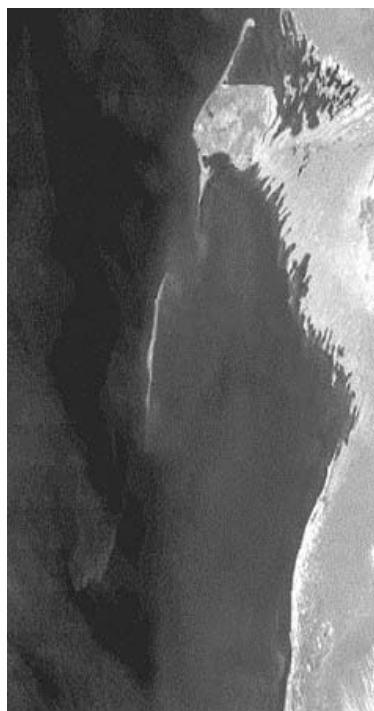
Исследование морского дна показали, что его рельеф сохранил морфоструктуры разного порядка. Здесь наиболее четко выражены геодинамические узлы, которые проявляются в виде линияментов и кольцевых структур. Благодаря отображению в рельефе морского дна большинства геологических структур (до 70%) позволило сделать вывод об их унаследованном развитии. Глубинным локальным структурам отвечают структурные террасы, замкнутые формы высотой до 100 м и больше. Было установлено, что шельф Каспийского моря имеет разломно-блочное строение и сформирован разломами четырех направлений. Субмеридиональные и субширотные разрывные нарушения, большинство из которых дешифруются как линияменты и их зоны, являются наиболее древними. К структуроформирующим разломам принадлежат более молодые северо-западные, которые контролируют неотектонические

активные зоны поднятий. Эти структуры наиболее благоприятны для образования нефтегазоносных ловушек. Углеводороды могут разгружаться в водной среде через разломы в разных геологических структурах, создавая на дне грифоны и грязевые вулканы. Достигая морской поверхности углеводороды взаимодействуя с водной поверхностью создают нефтяные слики, поверхностные температурные аномалии, а в приповерхностном слое воды градиенты температуры.

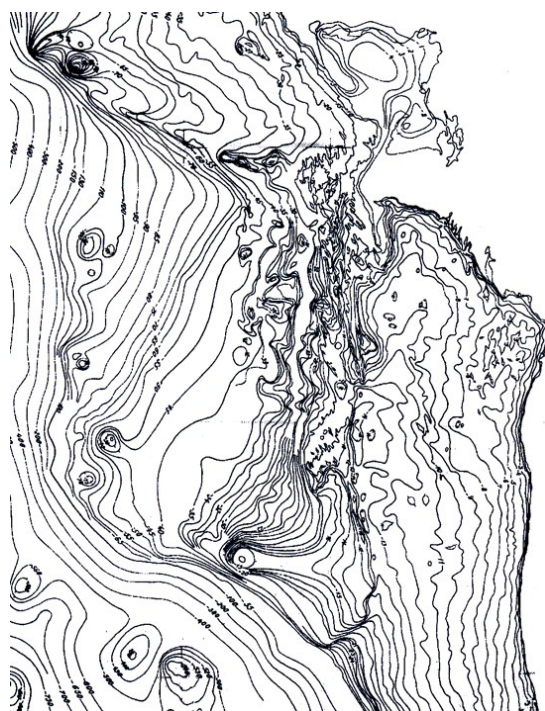
Полученная в результате исследований количественная оценка морфологических характеристик рельефа дна в зоне нефтегазоносных месторождений была использована в дальнейшем для комплексной оценки нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана.

Гидрология, океанология

По флюидопроводящим разломным структурам литосферы шельфовой зоны углеводородные газы поступают в водную среду, образуя пузырьки, грифоны и грязевые вулканы, интенсивность которых довольно большая [6]. Механизм прохождения миграционного потока углеводородных флюидов через водную толщу и взаимодействия его с водной поверхностью обусловлен рядом факторов, в том числе, типом гидрологии, которая зависит от времени года и акватории. На рис. 3 приведены реальные типы гидрологических разрезов, которые получены в разное время года и на разных участках акватории.



а



б

Рис. 2. а — фрагмент КС Terra-Modis северо-западной части Каспийского шельфа Туркменистана (R=500м, 545–565nm); б — фрагмент батиметрической карты северо-восточной части Каспийского шельфа Туркменистана

На рис. 4 приведены теневые фотографии морской среды, находящейся в разных гидрологических условиях. Фотосъемка проводилась с помощью тепловизионной фотокамеры при разном состоянии гидрологии и при погружении аппаратуры на глубины до 100 м. При гидрологии, близкой к изотермии (рис. 4 а), поднятие флюидов к свободной водной поверхности может сопровождаться эрлифтным

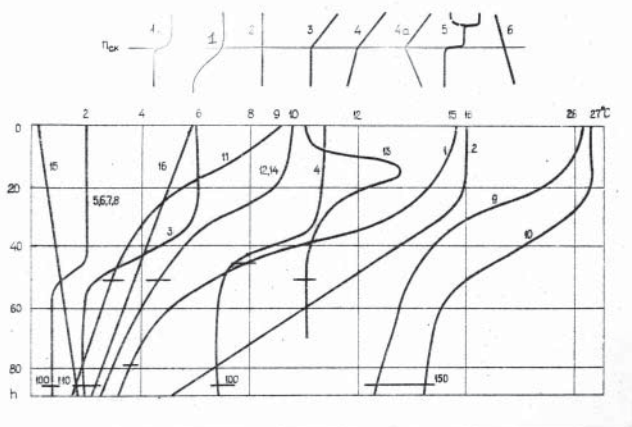


Рис. 3. Примеры различных типов гидрологических разрезов по глубине акватории

процессом — поднятие холодных глубинных вод к морской поверхности. Во втором случае, при наличии в стратифицированной водной толще градиентов плотности (рис. 4 б) мигрирующие флюиды вызывают образование внутренних волн, которые, распространяясь к водной поверхности, взаимодействуют с ней. В-третьих, при гидрологии с выраженным термоклином поток флюидов достигая его, вызывает колебание плотности (рис. 4 с), которые распространяются из области возмущения к свободной водной поверхности в виде внутренних волн. Частота этих волн известна как частота Брента-Вайселя, а величина, обратная ей (период волны), служит фундаментальным временным масштабом, который предопределяет колебательные движения в стратифицированной водной среде. Возникшие внутренние волны, взаимодействуя с водной поверхностью, вызывают изменения гидро-

физических характеристик приповерхностного слоя воды. Вследствие этого на свободной морской поверхности образуются аномалии поверхностной температуры, а в приповерхностном слое аномалии градиента температуры [9].

Согласно общепринятому определению, аномалия — это отклонение значения температуры в данном районе морской поверхности в определенный период (например, за сутки, неделю, месяц, сезон) от среднего ее значения за тот же период. Аномалии могут вычисляться путем сравнения значений температуры морской поверхности в одних и тех же точках, измеренных в данный момент времени, с вычисленной средней температурой, например, за многолетний период на тот же период года.

Информацию о температуре поверхностного слоя океана несет инфракрасное тепловое излучение его поверхности, интенсивность которого связана с обычной (термодинамической) температурой известным законом Стефана-Больцмана. Поскольку эту интенсивность можно измерить с помощью установленной на борту ИСЗ аппаратуры, то, следовательно, таким образом, можно определить и температуру океана. Основными приборами в тепловом инфракрасном диапазоне, являются сканирующие радиометры и тепловизоры, с помощью которых получают информацию о температуре поверхности океана в удобном и наглядном виде.

Локальные природные аномалии можно подразделить на две группы: первая — аномалии, которые обуславливаются местными подъемами холодных глубинных вод, теплообменом и перемешиванием, вторая — аномалии, которые вызываются течениями, меандрами вдоль границ течений и вихрями.

Подробная обработка и интерпретация имеющихся космических снимков известных месторождений с применением результатов моделирования и формирования полезного поискового сигнала позволили выделить набор эталонных аномалий сигнала в различных спектральных диапазонах, которые используются как калибровочные образцы.

На авиа- и космических снимках морской по-

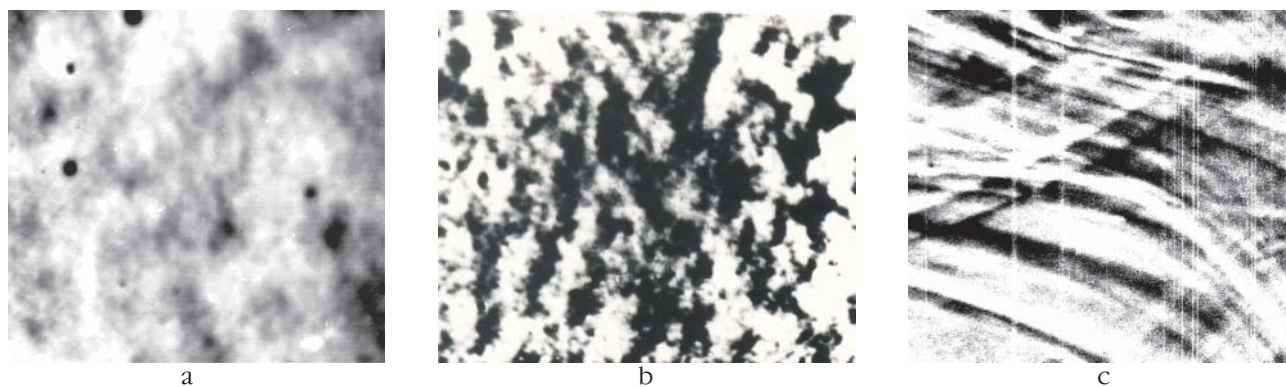


Рис. 4. Теневые фотографии водной среды: а — при изотермии, б — при наличии градиентов плотности, с — при направленной ориентации градиентов плотности

верхности наблюдаются температурные аномалии разного происхождения. Природные тепловые аномалии выделялись по отношению “сигнал/шум”, где в качестве шума рассматривались температурные вариации в данном месте в данный месяц на протяжении всего периода наблюдений, вызванные метеорологическими и другими факторами, не связанными с залежами углеводородов. На рис. 5 приводятся снимки, полученные с разных носителей тепловизионной аппаратуры: а — авиаснимок, снятый тепловизором в спектральном диапазоне 3.5–5.2 мкм, разрешением 350 м, контрастной чувствительностью 0.05°C; б — авиаснимок, снятый тепловизором в спектральном диапазоне 8–12 мкм, разрешением 50 м, контрастной чувствительностью 0,1°C; в — космический снимок AST_L1A. (на снимках более светлые участки соответствуют более высокой температуре).

Из рассмотрения рис. 5 можно сделать вывод, что наблюдаемая картина температурных аномалий по пространственным и температурным характеристикам в большой степени зависит от параметров измерительной аппаратуры и ее носителя.

Гидрофизика, гидродинамика

Гидрофизические процессы, протекающие в приповерхностном слое воды и формирующие его гидротермодинамический режим, достаточно сложны. В первую очередь это обусловлено поступлением в водную среду через границу раздела атмосфера-вода солнечного излучения и собственного излучения атмосферы. В свою очередь, водная среда формирует свой поток длинноволнового излучения. Кроме того, на приповерхностный слой влияют происходящие в нем конвективные потоки, турбулентность, внутренние и поверхностные волны, ветровое воздействие, испарение, осадки, облачность, течения и поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Исследованию температурного пограничного слоя, его возникновению и развитию посвящено много работ [5, 10, 19]. Интерес к изучению гидродинамики температуры морской поверхности и ее распределению в приповерхностном слое воды обусловлен, по крайней мере, двумя факторами: во-первых, в механизме энергомассообмена между атмосферой и океаном пространственное распределение температуры имеет важное значение, изучение которого необходимо при моделировании крупномасштабных процессов в моделях климата, что существенно для прогноза погоды и оценок долгосрочных климатических изменений.

Для приповерхностной толщи воды порядка 1 см уравнение теплового баланса имеет вид:

$$q = R + Q + i \quad (1)$$

где R — баланс длинноволновой радиации; Q — контактный теплообмен поверхности моря с атмосферой; i — затраты тепла на выпаривание.

В связи с трудностями путем расчетов определять полный тепловой поток, на практике используют метод непосредственного его измерения по градиенту температуры [12].

$$q = k \, dm/dz \quad (2)$$

где k — коэффициент теплопроводности приповерхностного пленочного слоя воды Z .

Значение k легко рассчитывается в пределах верхнего двухсантиметрового слоя воды:

$$k = k_0 (1 + \nu z) \quad (3)$$

где k_0 — молекулярное значение коэффициента теплопроводности ($Z = 0$), ν — скорость изменения k ($600 \, \text{м}^{-1}$).

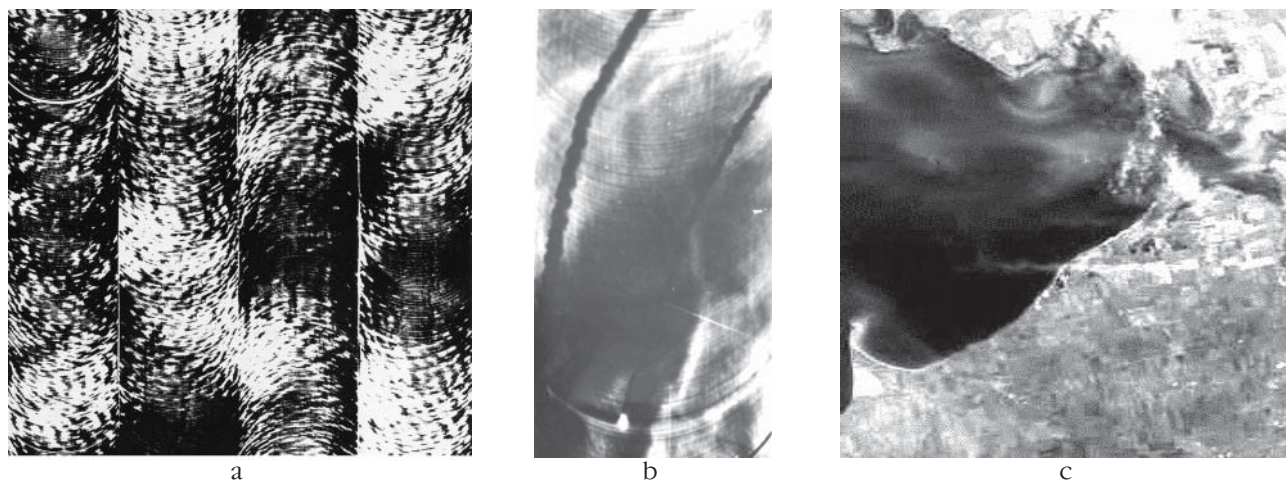


Рис.5. Температурные аномалии на морской поверхности

Задача определения общего теплового потока с морской поверхности сводится к измерению градиента температуры в приповерхностном слое воды. На образование пограничного слоя влияют фазовые переходы — выпаривание и конденсация, связанные с существенными затратами энергии. Эти процессы значительно усложняют математическое описание температурного пограничного слоя, которое выражается в образовании неустойчивых граничных условий.

Во втором случае интерес к гидродинамике приповерхностного слоя воды обусловлен тем, что по распределению температуры на поверхности и в приповерхностном слое можно судить о процессах, происходящих на глубинных горизонтах и в донных слоях водной среды, что можно использовать как один из информативных признаков при поиске залежей углеводородов [13].

Предыдущие исследования [5, 10, 19] показали, что в верхних слоях воды процессы турбулентной передачи тепла ослаблены. Это приводит к возникновению в поверхностном слое значительных градиентов температуры, величина которых определяется интенсивностью теплообмена вода-воздух. В обычных условиях температура поверхности воды меньше, чем на некоторой глубине. Причина этого явления, за редким исключением, заключается в том, что водная поверхность отдает тепло в атмосферу путем лучистой и турбулентной теплопередачи. Для выполнения условия баланса тепла необходимо наличие компенсирующего эти потери потока к поверхности из нижележащих слоев воды. На рис. 6 а представлен характерный профиль температуры в приповерхностном слое жидкости, измеренный с помощью термопары. Температура с глубиной вначале увеличивается до максимального значения, а затем начинает монотонно падать до температуры глубинных горизонтов.

Первые опыты по дистанционному исследованию процессов, происходящих в слое между морем и атмосферой, были проведены Мак Алистером с помощью разработанного им радиометра [20]. Экспериментально было установлено, что в приповерхностном слое формируется специфический пограничный слой размером в несколько миллиметров и градиентом температуры в несколько градусов. Это гидрофизическое образование получило название скин-слоя. Причем, в большинстве случаев, температура поверхности оказывается ниже температуры нижележащих слоев воды — холодный скин-слой. Поле температуры в нем формируется под действием различных, выше перечисленных, гидрологических и гидрофизических факторов. В поверхностном слое возникает неустойчивая стратификация, которая может приводить к конвективным движениям. В результате верхние слои воды проваливаются вглубь жидкости, образуя холодные термики. Процесс образования таких термиков носит периодический характер. На рис. 6 б приведена теневая фотография вертикального разреза приповерхностного слоя жидкости, на которой видно, что рассматриваемое явление имеет достаточно сложную структуру. Контраст изображения отражает перепады температуры в приповерхностном слое, величина которой пропорциональна яркости изображения.

Не менее сложной является термическая структура горизонтальных разрезов приповерхностного слоя, формирующегося вблизи раздела вода-атмосфера. На рис. 6 с изображены горизонтальные профили температуры на четырех глубинах: 0 мм, 3 мм, 6 мм и 15 мм. Из графиков видно, что по мере приближения к поверхности раздела значения температуры становятся все более изменчивы. Это обусловлено сложными гидродинамическими про-

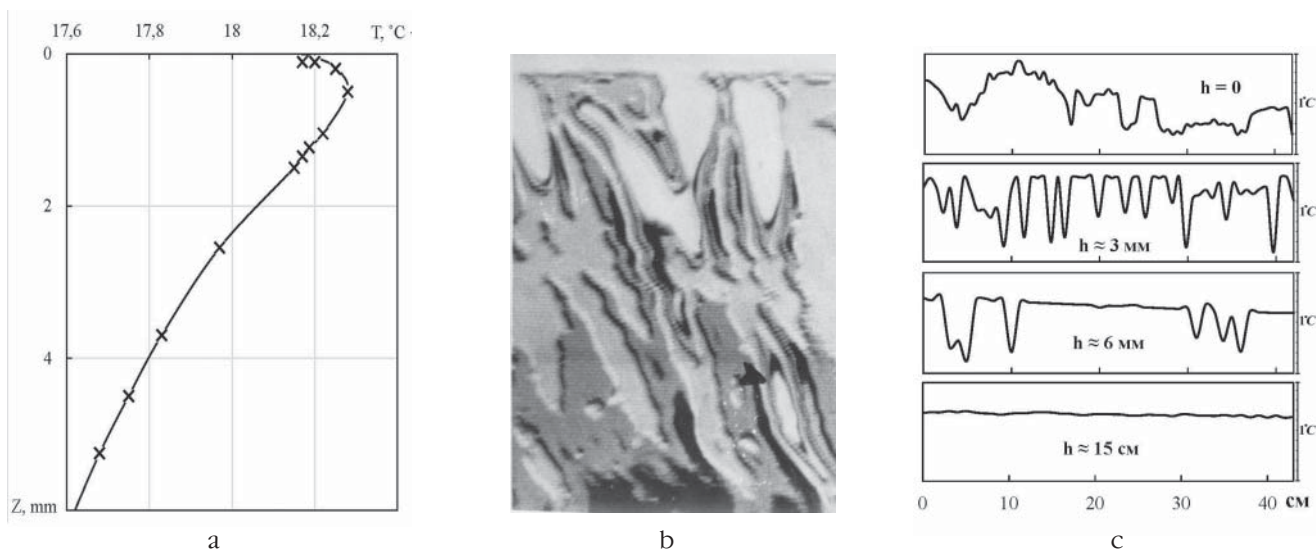


Рис. 6. а – характерный профиль температуры в приповерхностном слое жидкости; б – теневая фотография вертикального разреза в приповерхностном 5 мм слое жидкости; в – горизонтальное распределение температуры на четырех глубинах: $h = 0$ мм, 3 мм, 6 мм и 15 см

цессами, происходящими в тонких приповерхностных слоях.

Экспериментальное изучение гидрофизических процессов в приповерхностном слое воды сопряжено со значительными трудностями вследствие их малых размеров и невозможностью, в связи с этим, применить контактные методы измерений. Это обусловлено конечными размерами регистрирующего датчика, влиянием поверхностного натяжения при перемещении датчика через границу раздела вода-атмосфера и инерционностью измерительной системы. Поэтому, как правило, при исследовании процессов, которые происходят в приповерхностном слое и на глубинных горизонтах, используют неконтактные фото и теневые (тепловизионные) оптические системы. Для изучения свободной водной поверхности применяют дистанционные методы: спектрофотометрические, радиометрические, тепловизионные и радио методы, позволяющие получать информацию с высоким разрешением и точностью.

В работах [13, 14] изложены методы и результаты лабораторных и морских исследований гидрофизических процессов в приповерхностном слое воды с помощью оптической аппаратуры: тепловизионного прибора ИАБ-451, тепловизоров “Вулкан”, “Пингвин” и радиометров.

Известны модели температурного пограничного слоя [19]. Однако при их формировании влияние фазовых переходов на структуру термического пограничного слоя не учитывалось. В работе [9] методами термодинамики необратимых процессов были получены математические выражения для потоков массы и энергии через поверхность раздела жидкой и газообразной фазы. Так, в реальных условиях отсутствует резкая граница между водной поверхностью и атмосферой. В действительности над водной поверхностью всегда присутствует водяной пар с убывающей по высоте плотностью. Под влиянием внешних факторов пар и вода не находятся в состоянии термодинамического равновесия. Вследствие этого на границе раздела вода-пар происходят фазовые переходы. Полученные с помощью интегральных законов сохранения массы, импульса, энергии и энтропии соотношения связывают параметры жидкости и пара с учетом источников тепла за счет внешнего излучения: излучения солнца, собственного излучения атмосферы и излучения воды. Математическая модель неравновесной термической структуры границы раздела вода-атмосфера строится на основе предположения, что поверхность раздела вода-пар представляет собой: при $z > 0$ пар, при $z < 0$ — вода. Со стороны пара приходит внешнее излучение — I_0 . Вода и пар предполагаются поглощающими средами, при этом рассеяние не учитывается. Перенос лучистой энергии в паре и жидкости с некоторым уточнением описывается с помощью закона Бугера.

После достаточно сложных преобразований Е. И. Никифоровичем [9] были получены математические модели для определения распределения температуры в пограничном слое воды при различных начальных и граничных условиях. Ниже приводится математическая модель распределения безразмерной температуры $T_l^* = T_l / T_{loo}$ в приповерхностном слое жидкости, полученная при соответствующих граничных условиях, приведенных ниже.

$$T_l^* = 1 + T_{loo} - 1(T_s - T_{loo})e^{z^{**}} - q_{lo}^{z^{**}}e^{z^{**}}; \quad (4)$$

$$T_v(z \rightarrow +\infty) = T_{loo} = const, \text{ для пара}; \quad (5)$$

$$T_l(z \rightarrow -\infty) = T_{loo} = const, \text{ для воды}; \quad (6)$$

$$T_v(z = 0) = T_l(z = 0) = T_s - \text{температура водной поверхности} \quad (7)$$

где $z^{**} = z/z_p$, z_p — масштаб длины испарения, $q_{lo} = I_{lozl} / \lambda_l T_{loo}$, λ — коэффициент теплопроводности.

В работе [13] приведены результаты натурных морских исследований динамики разрушения и восстановления пограничного скин-слоя водной среды при разных метеорологических условиях. С помощью дистанционного радиометра в спектральном диапазоне 3.5–5.2 мкм, что отвечает эффективной глубине 0.06 мм, регистрировалась температура водной поверхности до разрушения пограничного слоя — T_s и после его разрушения — T_{sp} . На рис. 7 представлены зависимости $\Delta T = T_s - T_{sp}$ для трех случаев: 1 — при малой интенсивности излучения Солнца, 2 и 3 случаи при больших значениях солнечной радиации. При этом в разных опытах регистрировалась большая разница в перепадах температур ΔT и времени ее восстановления. Эти различия были связаны с изменяющимися внешними условиями опытов. Так, в первом случае: $\Delta T = -0.17$ К и 25 с время восстановления, во втором и третьем случае: $\Delta T = -0.5$ К и $\Delta T = -0.3$ К, время восстановления в обоих случаях более 90 с, что соответствует выше изложенным модельным представлениям гидрофизики скин-слоя. Таким образом, во всех трех опытах было зарегистрировано повышение температуры поверхности после разрушения холодного скин-слоя с помощью легкого плотика. Постепенно поверхностная температура принимала прежнее значение. Большое различие во времени восстановления поверхностной температуры объясняется разными внешними условиями.

Продолжением исследований приповерхностного слоя было изучение влияния облачности на термические характеристики холодного скин-слоя, которое было выполнено на основе дистанционного зондирования морской поверхности сканирующим тепловизором в инфракрасной области спектра 3.5–5.2 мкм [5].

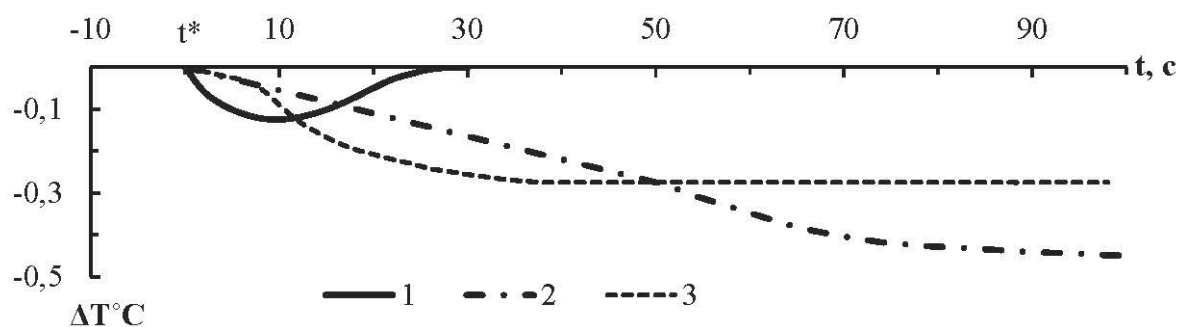


Рис. 7. Временная зависимость динамики восстановления скин-слоя при разных внешних условиях: 1 — зависимость, полученная при малой интенсивности излучения, 2 и 3 — при больших значениях солнечной радиации.

При появлении облачности нарушалось первоначальное стационарное состояние холодного ламинарного слоя, обеспеченное балансом потоков тепла. Эффективное излучение уменьшалось, что вызывало рост температуры скин-слоя и увеличение испарения, которое сопровождается отдачей тепла в атмосферу. Последнее компенсируется поступлением тепла из однородного слоя в холодный подслой до наступления нового квазистационарного состояния, вызванного отсутствием притока прямого солнечного излучения. После прохождения облака температура скин-слоя остается некоторое время выше своего первоначального состояния до полного исчезновения облачности, когда термические параметры скин-слоя начнут асимптотически приближаться к своим первоначальным значениям. Таким образом, при появлении облачности было зафиксировано и обосновано увеличение температуры водной поверхности.

Анализ гидрофизических процессов в приповерхностном слое воды, выполненный в приведенных выше работах, показывает, что существование холодного скин-слоя сохраняется при скорости ветра до 10 м/с, а время восстановления скин-слоя зависит от многих внешних факторов и может составлять десятки секунд.

На основе рассмотренных гидрофизических процессов для повышения эффективности поиска нефти и газа предлагается в качестве дополнительного информативного признака использовать аномалии градиента температуры в приповерхностном слое воды: $q = dT/dZ_{ef}$. Определить его можно путем последовательного измерения излучения воды в дальнем и близком инфракрасных спектральных каналах космических снимков. Далее, вычисляя значения температуры по известной методике [4] и определяя за формулой (8) эффективную глубину излучения Z_{ef} , рассчитывают градиент температуры в приповерхностном слое водной среды [15]. Например, используя дальний инфракрасный (10, 40–12.5 мкм, $Z_{ef} = 0.01$ мм), и ближний инфракрасные (2.09–2.35 мкм, $Z_{ef} = 0.4$ мм) каналы космического снимка Landsat,

$$Z_{ef} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) (dm_e / dZ) \cdot \alpha_e(\lambda)^{-1} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) (dm_e / dZ) d\lambda} \quad (8)$$

где $\varepsilon(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения, m_e — энергетическая светимость черного тела, $\alpha_e(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения.

Для расчетов эффективной глубины излучения в случае узкого спектрального интервала Мак Алистером было выведено выражение для $Z_{ef} = 1/\alpha_e(\lambda)$ [20]. В таблице 1 приведены значения Z_{ef} , рассчитанные в зависимости от оптической длины волны.

Таблица 1
Зависимость Z_{ef} от оптической длины волны

мкм	2.0–2.4	3.6–4.2	4.6–5.2	8.0–13.0
Z_{ef}	0.39	0.07	0.03	0.01

Геоиконика (теория геоизображений)

“Синтетическое научное направление, которое изучает и разрабатывает теорию геоизображений, методы их анализа, преобразования и использования в науке и практике” — Берлянт, 1985 [2]. Развитию геоиконики способствует тенденция интеграции картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования в науках о Земле. При этом геоиконика выступает как научное направление, связывающая эти дисциплины. Здесь много внимания уделяется теории и методам распознавания, обработки и дешифрированию, что позволяет понять содержательную сущность геоизображений. Задача распознавания понимается как разделение пространства признаков (текстур, рисунков, спектральных характеристик и др.) на области, относящиеся к одному из классов (эталону), на основе заранее выбранных значений признаков или критериев.

Практическое приложение геоиконики многооб-

разно. В данной статье нет необходимости более детально углубляться во все разделы геоиконики. Для нас важны методы и научно-технические решения, связанные с дешифрированием и использованием информации космического геомониторинга. В этом аспекте представляет интерес раздел геоиконики — интерпретация геоизображений. Эта область прикладной геоиконики опирается на научные знания географии, геологии, геофизики, социально-экономических и экологических дисциплин. И как пишет А. М. Берлянт [2], существует потребность “собрать под одну крышу опыт и достижения разных, сильно разветвленных отраслей...”. И далее подчеркивается, что интеграция теорий, методов, моделей и данных, разработанных и полученных в результате исследований в разных областях знаний и направленных на решение конкретной тематической задачи является плодотворной.

Приведенное выше обоснование эффективности интеграционной тенденции в геоиконики ещё раз подтверждает актуальность разработки методических основ дистанционных аэрокосмических исследований в природопользовании, как мультимеждисциплинарного научного направления.

Дешифрирование космических снимков морской поверхности Каспийского шельфа в разных спектральных диапазонах выполнялось на основе полученной в предыдущих разделах геологической, гидрологической и гидрофизической информации. При этом численные значения выбранных информативных признаков ЗУ определялись на эталонных участках и на всей исследуемой акватории. Для этого был использован один из методов анализа космических изображений — структурно-текстурный анализ. Текстурные характеристики, несмотря на сезонную погодную изменчивость, сохраняют качественную и количественную оценку на протяжении всего времени поиска ЗУ [18]. По простоте и компактности описаний они значительно превосходят морфологические признаки, их можно сравнить с инвариантами моментов или стохастическими инвариантами. В основе этих признаков лежит понятие текстуры — важнейшей характеристики зрительных моделей изображений. Текстура представляется оценками статистик энергетических и пространственно-энергетических распределений (так называемых амплитудных и амплитудно-фазовых признаков), оценками автокорреляционной и взаимокорреляционных функций (корреляционных признаков), спектров пространственных частот (спектральных признаков) или геометрических и энергетических параметров Реона — локальных признаков.

Существенным этапом в понимании и описании спутниковых изображений, стал анализ текстуры, который теперь является одним из самых важных методов используемых в анализе, сегментации и классификации текстурных изображений. Наибо-

лее часто в практике ДЗЗ применяются такие текстурные преобразования:

- линейные ортогональные преобразования: Фурье, Адамара, Хаара, наклонное и др. В этом случае текстурным спектром являются соответственно спектр Фурье, Адамара, Хаара и др., а текстурной частотой его двумерный аргумент;
- автокорреляционные преобразования. Текстурным спектром является автокорреляционная функция, а текстурной частотой — двумерное смещение;
- преобразования к гистограмме. Текстурным спектром является гистограмма яркости, а роль одномерной текстурной частоты выполняет значение яркости. Обычно используются производные текстурные признаки среднее, дисперсия и др.;
- преобразования к матрице смежности. Текстурным спектром является матрица смежности, а в трехмерную частоту входят значения яркости двух смежных элементов и угол, задающий направление смежности. Обычно используются производные текстурные признаки: энергия, энтропия, контраст и др. [3].

Выбор текстурного преобразования должен производиться в зависимости от конкретной задачи. Так, при исследовании периодических текстур целесообразно применять преобразование Фурье. При поиске объектов заданной формы лучшие результаты дают методы согласованной фильтрации, которые сводятся к линейному ортогональному преобразованию, обусловленному формой объекта, положением и максимумам текстуры спектра.

Коэффициенты автокорреляции яркости геоизображений, к которым относится изображение водной поверхности, достаточно точно аппроксимируются экспоненциальными функциями. Это позволяет, как стохастическую модель изображений, использовать случайный двухмерный Марковский процесс. Математической формой описания Марковской модели изображения является матрица смежных вероятностей (МСВ) значений яркости космического снимка. Учитывая, что яркость изображения обычно передается 8-мью разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ такого процесса имеет размер 256×256 элементов [21]. Этот метод был успешно использован в задачах анализа текстуры геоизображений. Наша цель — применить алгоритм классификации текстуры изображений водной поверхности, основанный на матрицах смежных вероятностей градаций серого.

На все алгоритмы статистического анализа текстуры распространяется общая задача: обеспечение характеристик, измеряющих визуальное качество восприятия текстурных образов. Успех МСВ связан непосредственно с точностью, с которой матрица захватывает структуру основной текстуры. Это было показано по содержанию текстурной информации, информации гистограммы, информации формы и

информации края. МСВ фактически является двумерной гистограммой частоты значений пары величин пикселей с данной пространственной связью. Этот метод был успешно использован при анализе текстуры нефтегазоперспективных участков территории Каспийского шельфа [1]. Текстурные характеристики геоизображений описываются с помощью набора параметров Харалика: дисперсии, энтропии, энергии, локальной однородности и др. Ниже, в качестве примера, рассматриваются три из них: энергия или второй момент (9), энтропия (10) и локальная однородность (11).

1. Энергия или второй момент:

$$E = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij}^2 \quad (9)$$

2. Энтропия:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} \log(p_{ij}) \quad (10)$$

3. Локальная однородность:

$$L = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_{ij} / [1 + (i - j)^2] \quad (11)$$

Космические изображения каспийского шельфа с КА Terra MODIS и ASTER были обработаны с помощью метода количественного текстурного анализа, а именно вычисления параметров Харалика: — по параметрам: “энергия”, “энтропия” и “однородность”.

На рис. 8 а, в качестве примера, показан космический снимок Modis с пространственным разрешением 500 м, спектрального диапазона 0.545–0.565 мкм. На рис. 8 б представлены результаты его обработки в виде градаций яркости по космическому изображению, полученные путем вычисления параметра Харалика “энтропия” в соответствии с выражением (9). На рис. 9 а показан фрагмент космический снимок Terra ASTER с пространственным разрешением—15 м, спектрального диапазона 0.52–0.60 мкм. На рис. 9 б — результаты его детальной обработки, полученные путем вычисления параметра Харалика “энтропия”.

Сравнение и анализ результатов дешифрирования представленных космических снимков (рис. 8 и 9) показывает, что на изображениях, полученных в результате обработки, визуально наблюдаются фрагменты, что не выявлялись на космических снимках до обработки. Так, например, на рисунках, полученных после обработки изображения и обнаружения на них текстур на шельфе наблюдаются расположены вдоль береговой линии структуры различных размеров и форм. Это свидетельствует об информативности полученных дополнительных текстурных характеристик, которые могут быть ис-

пользованы при исследовании геологических структур участков морского шельфа. Из сравнительного анализа батиметрических карт рельефа морского дна с полученными текстурными характеристиками можно сделать вывод, что они в значительной степени соответствуют особенности рельефа дна. Таким образом, текстурная обработка космических снимков дает объективную информацию об особенностях дна морского шельфа, что является дополнительным информативным признаком для выделения нефтегазоперспективных объектов.

Системный анализ

На заключительном этапе исследований выполнялась интегральная оценка нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана. Учитывая, что исследуемая среда морского шельфа является сложной системой для оценки нефтегазоперспективности и детального определения приоритетности отдельных участков шельфа, целесообразно использовать общий методический принцип и математический аппарат системного анализа.

В связи с этим задача решалась в два этапа. На первом, при исследовании 31 лицензионного участка территории Каспийского шельфа (рис. 1 б) на региональном уровне был применен метод анализа иерархий — МАИ [11]. В этом случае для получения экспертных оценок нефтегазоносности участков территории на разных иерархических уровнях информативных характеристик привлекается широкий круг экспертов, которые представляют разные области знаний. Далее, в результате последовательной комплексной обработки полученной информации с учетом весовых коэффициентов и места информативных характеристик в иерархической системе формируется целевая функция, с помощью которой оценивается степень приоритетности исследуемых участков для их классификации и отбора наиболее перспективных из них.

Суть метода анализа иерархий состоит в декомпозиции процедуры оценки приоритетности исследуемых участков на более простые составляющие по иерархическим уровням. Каждый элемент уровня может представлять разные аспекты решаемой задачи, причем могут рассматриваться как материальные, так и нематериальные факторы, количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки. На их основе ведется экспертная оценка составляющих (критериев) каждого иерархического уровня, и их формализация путем вычисления частичных и глобальных векторов приоритетов. Для получения указанных векторов строится множество матриц парных сравнений по каждой составляющей иерархического уровня и ведется оценка векторов приоритетов с точки зре-

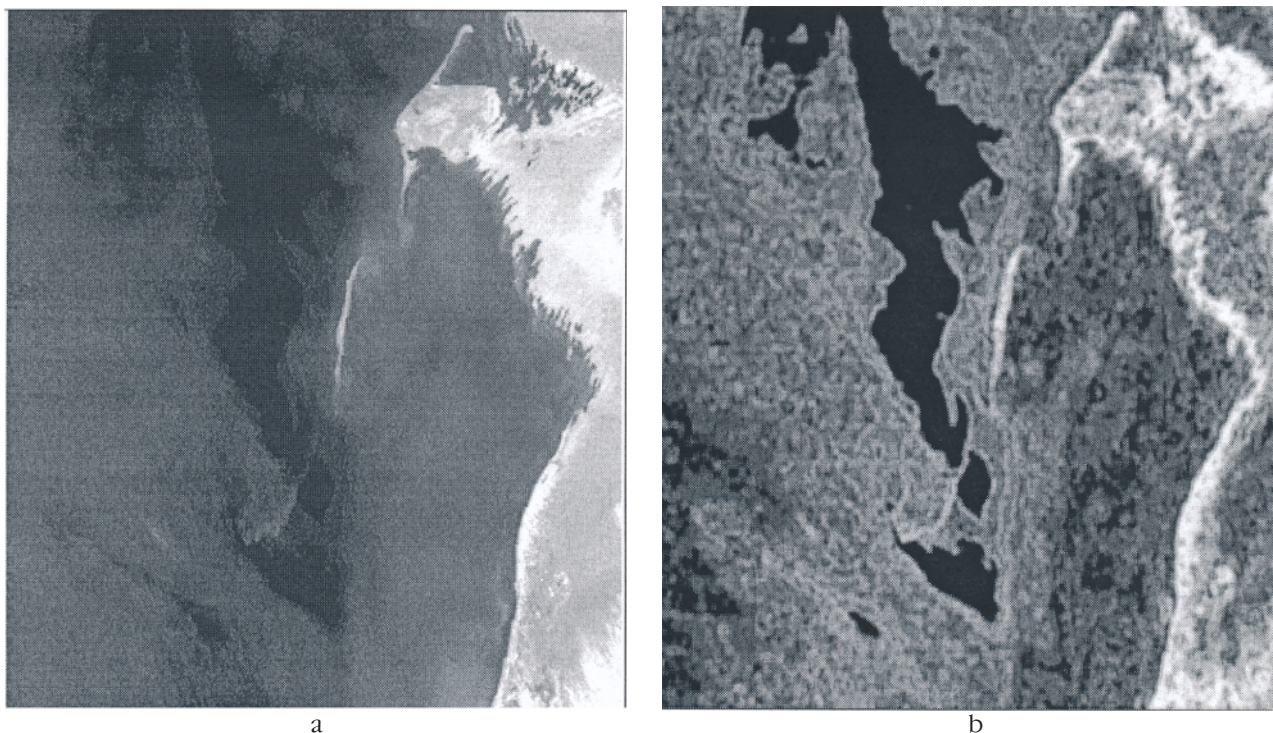


Рис. 8: а – фрагмент космического снимка Terra MODIS; б – результаты дешифрирования на основе количественного текстурного анализа “Энтропия”

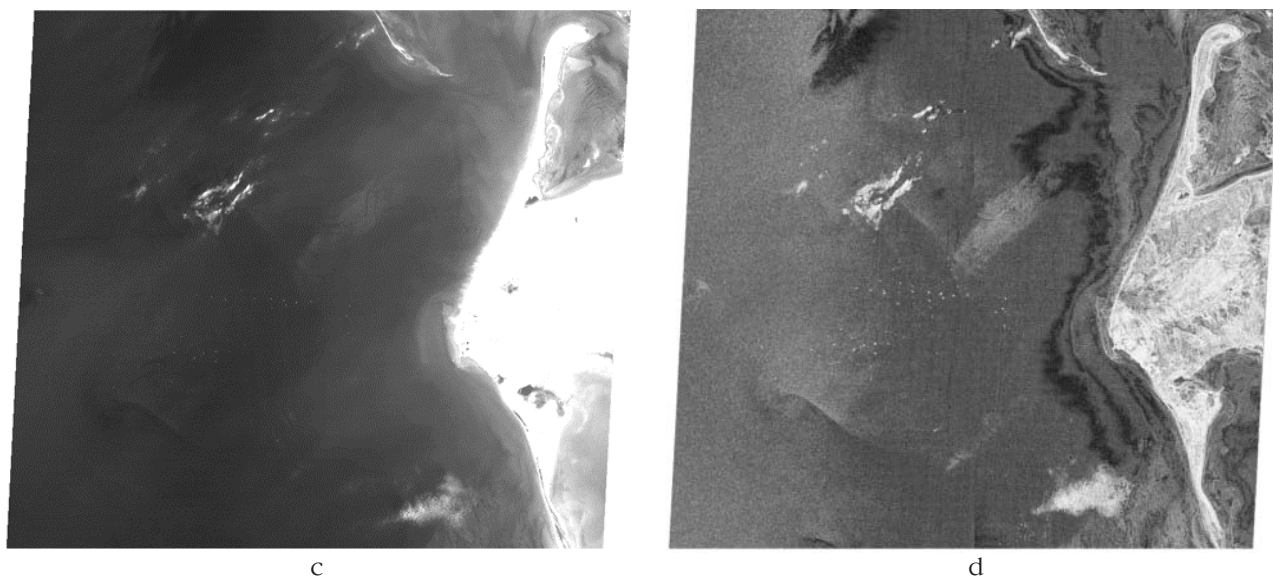


Рис. 9: а – фрагмент космического снимка Terra ASTER; б – результаты дешифрирования на основе количественного текстурного анализа “Энтропия”

ния их влияния на составные предыдущего уровня. Приоритетность участков определяется по обобщенному критерию, значение которого исчисляется на основе значений векторов локальных приоритетов.

Наиболее ответственным этапом является построение иерархической модели. На нулевом уровне находится целевая установка — системная оценка нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана по данным ДЗЗ и наземным наблюдениям. Первый уровень состоит из источни-

ков информации, которые используются для анализа участков: космические снимки в оптических и радио спектральных диапазонах, разных картографических материалов (геологические, гидрологические и гидрофизические карты). Второй уровень включает методы обработки полученной информации: спектральный, структурно-текстурный, морфометрический и морфоструктурный анализы. На третьем уровне находится перечень информативных признаков наличия углеводородов: значения спектральной яркости и радио яркости космического изобра-

жения, температуры и градиента температуры морской поверхности, текстуры космического изображения, морфологических характеристик рельефа дна, относительные значения которых на каждом участке определяются по балльной шкале. Четвертый уровень состоит из перечня исследуемых участков и результатов их интегральной оценки по степени нефтегазоперспективности.

Когда проблема представлена иерархично и эксперты, сопоставляя попарно альтернативы, формируют систему преимуществ между элементами уровней, присваивая каждому из них определенный балл в шкале относительной значимости, составляется матрица попарных сравнений. В результате система преимуществ представляется квадратной матрицей. Подобные матрицы должны быть построены для парных сравнений каждой альтернативы на втором уровне по отношению к первому уровню, на третьем по отношению ко второму и т.д. Элементы матриц заполняются оценками, суждениями эксперта или их группы об относительной важности сравниваемых отдельных элементов относительно цели, или критерия, находящегося на более высоком уровне.

Матрица парных сравнений имеет вид:

$$W_{gr} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_r & \dots & A_n \\ A_1 & 1 & s_1/s_2 & \dots & s_1/s_r & \dots & s_1/s_n \\ A_2 & s_2/s_1 & 1 & \dots & s_2/s_r & \dots & s_2/s_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_g & s_g/s_1 & s_g/s_2 & \dots & s_g/s_r & \dots & s_g/s_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & s_n/s_1 & s_n/s_2 & \dots & s_n/s_r & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

где $A_1, A_2, \dots, A_n$ — параметры, которые составляют иерархический уровень; s_q/s_r — отношение абсолютных приоритетов s_q, s_r , q -го и r -го параметров; n — число критериев, сравниваемых на данном уровне.

$$\|a_{ij}\|, a_{ji} = 1/a_{ij}, \quad (13)$$

где $i, j = 1, \dots, n$ — число критериев, которые сравниваются на каждом уровне.

Далее вычисляем компоненты собственного вектора матрицы

$$a_1 = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{1j}}; \dots; a_n = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{nj}} \quad (14)$$

Обработка матриц дает возможность вычислить векторы приоритетов K_1, K_2, K_3, K_4 соответствующих уровней, компоненты которого определяют их приоритеты с точки зрения эксперта. С полученных групп матриц определяем нормальные оценки вектора локальных приоритетов:

$$K_1 = a_1 / \sum_i a_i; \dots; K_n = a_n / \sum_i a_i \quad (15)$$

После того как компоненты собственного вектора получены для всех строк матрицы в соответствии с выражениями (14), становится возможным их использование для дальнейших вычислений.

Метод анализа иерархий позволяет сконструировать необходимую целевую функцию и оценить степень воздействия на нее каждой из характеристик исследуемой системы. Если получены все необходимые весовые коэффициенты, то формула свертки обобщенного критерия для сравниваемых вариантов имеет вид:

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s \quad (16)$$

где верхний индекс критериального приоритета обозначает уровень иерархии p ; — коэффициент преимущества варианта по показателю.

Полученные значения F позволяют установить приоритетность участков каспийского шельфа Туркменистана (№ 1–31) для следующей детальной классификации более перспективных с них.

Метод анализа иерархий был реализован в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины программно, были выполнены исследования приоритетности участков каспийского шельфа Туркменистана для последующей геофизической разведки.

На втором этапе для детального исследования было выбрано три поисковых участка (№1, №2, №3), получивших на первом этапе по целевой функции наибольший балл.

Задача заключалась в их оценки на нефтегазоперспективность и определении наиболее перспективного участка-площадки для последующей геофизической разведки. Эта задача выполнялась методом аналитических сетей (МАС) [11]. Выбор этого метода обусловлен тем, что МАС позволяет обрабатывать более разнообразные и сложные структуры с учетом зависимостей между уровнями и обратными связями между элементами уровня, тем самым достигая большую объективность и достоверность в принятии решений. МАС используют для детального анализа в случаях принятия ответственных решений, но, в отличие от МАИ, этот метод является более трудоемким и требует значительных временных затрат. Сеть представляет собой набор компонентов, которые являются аналогом уровней в МАИ.

В сетевых задачах компоненты рассматриваются как взаимодействующие объекты, которые влияют друг на друга относительно четко сформулированного управляющего критерия. Любое решение в МАС представляется в виде ориентированной сети, в отличие от МАИ, где потоки строго направлены сверху вниз.

Для определения наиболее нефтегазоперспективного участка на основе МАС проводится структурирование проблемы в виде сетевой модели, на основе которой определяются взаимосвязи между

предложенными альтернативами и обобщенными критериями выбора (рис. 10).

Взаимные влияния элементов в сети также можно представить следующей суперматрицей:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{matrix} & \begin{matrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nn} \end{matrix} \end{matrix} \quad (17)$$

Элементы W_{qr} в суперматрице называются блоками и представляют собой матрицы парных сравнений (12), C_p, C_2, C_n — критерии.

Рассмотрим более подробно процесс выявления наиболее нефтегазоперспективного участка. В качестве программного средства нами был использован ПП Super Decision.

Расчет состоит из трёх шагов.

Шаг 1. Определение экспертами в предметной области приоритетов по которым будут оцениваться каждый из трёх участков. Оценка проводилась по шкале интенсивности от 1 до 9, которая предложена Т. Саати [11] (табл. 2).

Дальше в ПП Super Decision строятся взаимосвязи между критериями и альтернативами и по каждому вносятся экспертные оценки (рис. 11)

Шаг 2. Рассчитывается суперматрица и предельная матрица элементов взаимосвязи. Определяются наиболее нефтегазоперспективные участки по отдельным обобщенным критериям (“Выгоды —

Таблица 2

Значения экспертных оценок в системе аналитических сетей

Шкала интенсивности	Качественные суждения
1	Равная важность
3	Умеренное превосходство одного над другими
5	Существенное превосходство одного над другими
7	Значительное превосходство одного над другими
9	Очень сильное превосходство одного над другими
2, 4, 6, 8	Соответствующие промежуточные значения

нефтегазоперспективность”, “Затраты”, “Риски”) (рис. 12)

Шаг 3. В зависимости от поставленной задачи определяется формула, по которой будет рассчитан наиболее нефтегазоперспективный участок с учетом обобщенных критериев и экспертных оценок по приоритетам выбранных критериев. В рассматриваемом случае была использована стандартная аддитивная (вероятностная) формула (additive (probabilistic)). На основе окончательного ранжирования объектов были получены результаты, которые представлены на рис. 13.

Таким образом в результате детального исследования на основе МАС и в соответствии с данными окончательного ранжирования были получены следующие оценки нефтегазоперспективности трех выбранных участков Каспийского шельфа Туркменистана: №1 — 0.31; №2 — 0.39 и №3 — 0.30.



Рис. 10. Сетевая модель взаимосвязей между предложенными альтернативами и обобщенными критериями выбора для определения наиболее нефтегазоперспективного участка

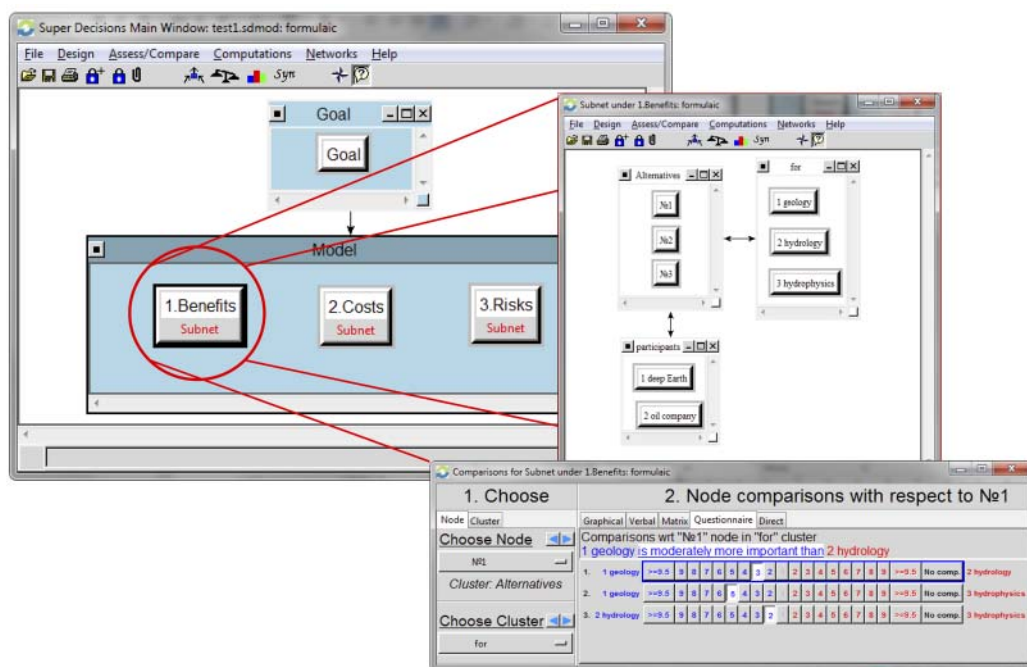


Рис. 11. Пример построения взаимосвязей между критериями и альтернативами в ПП Super Decision

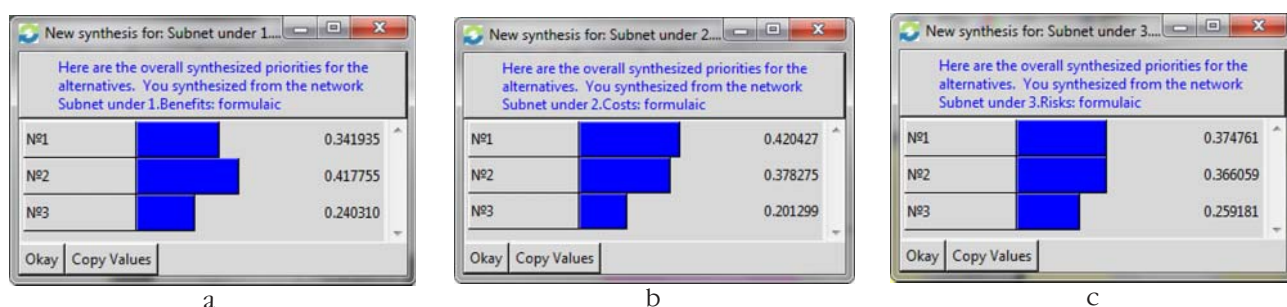


Рис. 12. Результаты детального исследования нефтегазоперспективных участков по отдельным обобщенным критериям: а — “Выгоды — нефтегазоперспективность”; б — “Затраты”; с — “Риски” в программном окне ПП Super Decision

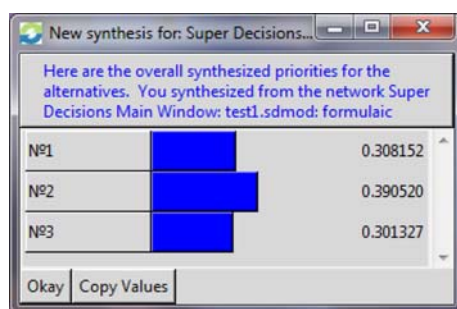


Рис. 13. Результаты определения наиболее нефтегазоперспективного участка Каспийского шельфа Туркменистана

Выводы

Дистанционные аэрокосмические исследования нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана, выполненные с привлечением знаний из геологии, гидрологии, гидрофизики, геоэкологии и системного анализа наглядно показали мульти-междисциплинарную научную направленность дистанционных

аэрокосмических исследований в природопользовании.

Обнаружение на фоне природных температурных аномалий информативных признаков залежей углеводородов по температуре свободной водной поверхности представляется достаточно сложной задачей.

В результате проведенных исследований для повышения вероятности прогнозирования и эффек-

тивності пошуку місцезнаходжень нафти і газу на основі космічної інформації ДЗЗ пропонується, як додатковий інформативний ознак, використовувати градієнт температури поверхнового шару води шляхом обчислення за даними багоспектральних космічних знімків значень температури в двох спектральних діапазонах (дальнього і ближнього інфрачервоного) і ефективну глибину випромінювання за формулою (2).

Література

- Архіпова Т. О. Оцінка нафтогазоперспективності територій з використанням системного підходу та космічної інформації для наступної геофізичної розвідки / Т. О. Архіпова, З. М. Товстюк, З. В. Козлов, О. Д. Федоровський, В. Г. Якимчук // *Геоінформ.* — 2006. — № 3. — С. 40–45.
- Берлянт А. М. Теорія зображень / А. М. Берлянт — М.: ГЕОС, 2006. — 261 с.
- Козубцов И. Н. Междисциплинарная область знаний — как новая научная специальность / И. Н. Козубцов // *Будущее технической науки: сборник материалов XI Междунар. молодеж. научно-техн. конф.; НГТУ им. Р. Е. Алексеева.* — Нижний Новгород: 2012. — С. 409–410.
- Красавцев М. М. Радиометрическая установка для измерения вертикального градиента температуры в поверхностном слое воды / М. М. Красавцев, А. А. Сивков // *Тр. Главн. геофиз. Обсерватории.* — 1972, — вып. 275. — С. 212–217.
- Куфтарков Ю. М. О температурном скин-слое океана / Ю. М. Куфтарков, Б. А. Нелепо, А. Д. Федоровский // *Докл. АН СССР.* — 1978 — №2. — С. 296–299.
- Лялько В. И. Теоретико-методические основы и результаты поисков газовых месторождений на шельфе Черного моря с использованием материалов космических схемок / В. И. Лялько, В. М. Перерва, Ю. В. Костюченко // в кн. *Геология и полезные ископаемые Черного моря.* — Киев: 1999. — С. 67–79.
- Лялько В. И., Федоровский А. Д., Попов М. А. [и др.] / В. И. Лялько, А. Д. Федоровский, М. А. Попов Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем // *Космічні дослідження в Україні 2002–2004.* — Київ, 2004. — С. 7–14.
- Междисциплинарные исследования в науке и образовании. Официальная страница электронного журнала “Междисциплинарные исследования в науке и образовании”. — Режим доступа URL: <http://mino-esrae.ru/>.
- Никифорович Е. И. Вывод граничных условий для задач теплообмена в газожидкостных системах с фазовыми переходами / Е. И. Никифорович // *Гидромеханика.* — 1987. — Вып. 56. — С. 36–39.
- Никифорович Е. И. Гідротермодинаміка приповерхневого шару рідини / Е. И. Никифорович, О. Д. Федоровський // *Вісн. АН УРСР.* — 1984. — №11. — С. 15–21.
- Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Томас Л. Саати; пер. с англ.; [научн. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова]. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 360 с.
- Спосіб виявлення нафтогазоперспективних ділянок на морському шельфі / В. І. Лялько, М. О. Попов, С. А. Станкевич, А. І. Воробйов // Патент України на винахід № 88090. Бюлетень № 17 від 10.09.2009 р.
- Федоровский О. Д. Термическая структура границы раздела воздух-вода и оптические методы ее исследования / О. Д. Федоровский, Е. И. Никифорович, В. Ю. Филимонов // *Тр. Междунар. конф. “Гидродинамика и физические процессы в жидкостях и в дисперсных системах”.* — Прага, 24–26 мая. — 1983 г. — С. 317–320.
- Федоровский А. Д. Оптические методы в гидромеханике / А. Д. Федоровский. — Киев: Наукова думка, 1984. — 175 с.
- Федоровский А. Д. Процессы переноса в системах газ-жидкость / А. Д. Федоровский, Е. И. Никифорович, Н. А. Приходько. — Киев: Наукова думка, 1988. — 255 с.
- Федоровский А. Д. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода / А. Д. Федоровский, М. В. Артюшенко, З. В. Козлов // *Космічна наука і технологія.* — 2004. — Т. 10. — № 1. — С. 54–60.
- Философов В. П. Основы морфологического метода поисков тектонических структур / В. П. Философов — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. — 232 с.
- Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture / R. M. Haralick // *Proc. IEEE.* — 1979. — V. 67. — №5. — P. 786.
- Katsaros K. D. The aqueous thermal boundary layer / K. D. Katsaros // *Boundary layer Meteorol.* — 1980. — 18, №1. — p. 107–127.
- Mc Alister E. D. Measurement of total heat flow from the sea surface / Mc Alister E. D. // *Appl. Opt.* — 1964. — №56. — P. 188–201.
- Rabiner L. R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition / L. R. Rabiner // *Proc. IEEE.* — 1989. — V. 77. — №2. — P. 257–285.

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ, ЯК МУЛЬТИ-МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ НАУКОВИЙ НАПРЯМОК (НА ПРИКЛАДІ ОЦІНКИ НАФТОГАЗОПЕРСПЕКТИВНОСТІ ДІЛЯНОК КАСПІЙСЬКОГО ШЕЛЬФУ ТУРКМЕНИСТАНУ)

А. В. Соколовська, О. Д. Федоровський

У статті обґрунтовується методична основа дистанційних аерокосмічних досліджень в природокористуванні, як мульти-междисциплинарного наукового напрямку, що використовується в дослідженнях знання з різних наукових дисциплін на прикладі нафтогазоперспективних робіт в зоні Каспійського шельфу Туркменістану.

Ключові слова: дистанційні аерокосмічні дослідження, природокористування, мульти-міждисциплінарність, морський шельф, нафта і газ, геологія, гідрологія, гідрофізика, геоіконіка, системний аналіз

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF REMOTE AEROSPACE RESEARCH IN THE WILDLIFE MANAGEMENT (NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT) AS THE MULTI-INTERDISCIPLINARY RESEARCH FIELD (THE ASSESSMENT OF OIL AND GAS AREAS OF THE CASPIAN SHELF OF TURKMENISTAN AS EXAMPLE)

A. V. Sokolovska, A. D. Fedorovsky

The article reveals the methodological basis of remote aerospace researches in nature resources and environmental management as an interdisciplinary approach that uses knowledge from different studies on the example of the oil and gas exploration in the Caspian shelf of Turkmenistan.

Keywords: remote aerospace research, wildlife management (natural resources and environmental management), multi-interdisciplinary, sea shelf, oil and gas, geology, hydrology, hydrophysics, geoiconica, system analysis