

УДК 550.837.82; 528

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД ПОИСКА МИНЕРАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ

Академик В.Г. Бондур, аспирант В.А. Макаров, кандидат техн. наук. А.Б. Мурынин

Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»,
Рособразования и РАН, Москва
E-mail: office@aerocosmos.info

Аннотация. Предложен дистанционный метод оценки элементного состава минералов с целью разведки некоторых полезных ископаемых, находящихся вблизи земной поверхности. Анализируются физические предпосылки реализации предлагаемого метода, описывается методика прогностического численного моделирования методом Монте-Карло. Приводятся примеры численных расчетов для оценки возможности обнаружения одного из видов полезных ископаемых (магнетита) по характеристикам гамма-спектров, формирующихся при облучении зондируемой поверхности пучком протонов от мобильного ускорителя.

Ключевые слова: поиск минералов, компьютерное моделирование, протонный ускоритель, гамма спектры, распространение гамма-излучения в атмосфере

Abstract. A method for estimation of elementary composition of minerals has been proposed in order to explore some mineral deposits located nearby the Earth's surface. Physical bases for the implementation of the proposed method are analyzed; a technique of forecasting computer simulation by the Monte-Carlo method is described. An example of such a simulation for estimation of an ability to detect one of the mineral deposits (magnetite) by gamma-spectra formed by irradiation of a surface with a proton beam of a mobile accelerator is given.

Keywords: computer simulation, proton accelerator, gamma spectra, gamma propagation in atmosphere

Введение. Одной из актуальных и нерешенных задач дистанционного зондирования (ДЗ) является оценка состава минералов вблизи земной поверхности для поиска полезных ископаемых. Традиционные методы ДЗ используют электромагнитное излучение как в качестве зондирующего, так и в качестве источника полезного сигнала. При этом регистрируемые сигналы несут мало информации о характеристиках подповерхностных объектов, как в силу ограниченной проникающей способности электромагнитных волн, так и вследствие специфики взаимодействия этих волн с веществом, не позволяющей, как правило, идентифицировать присутствие того или иного минерала. Разработка новых методов ДЗ, использующих альтернативные виды зондирующего излучения, позволит получать качественно новую информацию об элементном составе вещества вблизи земной поверхности.

В связи с этим хорошие перспективы открываются при использовании в качестве зондирующего излучения потоков элементарных частиц. Эти частицы способны преодолевать большие расстояния, проникать на некоторую глубину в зондируемые объекты и формировать при взаимодействии с веществом в зондируемых объектах информативные сигналы-отклики, характеристики которых связаны с изотопным составом вещества в этих объектах.

В настоящее время элементарные частицы уже используются при ДЗ, например, для определения загрязнений в почве [1], а также для изучения состава поверхности Луны, астероидов и комет в процессе космических исследований [2].

Настоящая статья посвящена разработке метода дистанционного поиска минералов вблизи земной поверхности, в котором поток

зондирующих элементарных частиц обеспечивается источником высокозергичных протонов (ускорителем), установленном на авиационном носителе.

Физические основы метода. Известно, что химические элементы, являющиеся основой любого вещества, наиболее достоверно могут быть идентифицированы по их атомному излучению. Атом любого элемента, находясь в возбужденном состоянии, способен излучать гамма-кванты с определенным конечным набором энергий, по которому и может быть проведена идентификация [3]. В таблице для некоторых элементов, достаточно широко представленных в земных минералах, приведены наиболее вероятная и максимальная энергии гамма-квантов, испускаемых при захвате данными элементами тепловых нейтронов [4, 5]. Данная ядерная реакция является одним из возможных механизмов перехода атома в возбужденное состояние.

Исходное ядро	Наиболее вероятная энергия гамма-квантов, МэВ	Максимальная энергия гамма-квантов, МэВ
^{24}Mg	3,91	7,30
^{28}Si	3,53	8,47
^{56}Fe	7,63	7,64
^{58}Ni	8,99	8,99

В целом, энергетические спектры гамма-квантов, образованных при реакциях захвата тепловых нейтронов, для большинства элементов состоят из наборов ярко выраженных пиков. Это дает возможность с достаточной достоверностью говорить о присутствии какого-либо химического элемента в зондируемом объекте в случае присутствия характерных пиков в спектре регистрируемого сигнала.

Если инициировать возбуждение атомов веществ исследуемого объекта под поверхностью Земли, открывается возможность дистанционной определения элементного состава этого объекта по спектральным характеристикам инициированного гамма-излучения, которое может быть зарегистрировано с помощью детекторов, находящихся на значительном расстоянии от поверхности.

Важное отличие предлагаемого метода — возможность использования мобильного ускорителя, который излучает протоны с энергиями в несколько сотен МэВ. Ускоритель используется в качестве инициирующего устройства для возбуждения атомов веществ

исследуемого объекта. Протонный ускоритель имеет преимущество перед нейтронными источниками, используемыми обычно для активации вещества через реакцию захвата тепловых нейтронов. Это обусловлено тем, что высокозергетический протонный пучок способен переносить до исследуемой области значительно больше энергии, которая преобразуется в информативные сигналы-отклики в зондируемом объекте.

Для возбуждения атомов веществ в исследуемом объекте в данном случае будут использованы тепловые нейтронны, формирующиеся в атмосфере и исследуемом объекте потоком каскадных частиц (протонов, нейтронов и др.), возникающих при прохождении через слой атмосферы высокозергетических протонов. В результате взаимодействия с веществом формируется поток восходящих элементарных частиц, в том числе гамма-квантов, несущих информацию об элементном составе вещества. При этом наибольший интерес представляют гамма-кванты от реакции радиационного захвата тепловых нейтронов в исследуемом объекте, поскольку эти гамма-кванты несут важную информацию о порождающих их элементах.

Источник высокозергетических протонов может быть установлен на подвижном носителе, например, на вертолете, чем обеспечивается возможность обследования значительных площадей в ограниченные интервалы времени. На этом же носителе могут быть установлены детекторы для регистрации восходящих потоков частиц от поверхности, содержащих интересующие нас гамма-кванты. При анализе результатов ДЗ следует учесть, что наряду с полезным сигналом (искомыми гамма-квантами, образующимися после реакции захвата тепловых нейтронов исследуемой поверхностью и близлежащим подповерхностным объемом) на детектор также будут приходить потоки частиц от других реакций, создающие помехи при регистрации полезного сигнала. Источниками фона и помех будут служить как участки поверхности, разнородные по составу, так и слой атмосферы между носителем и поверхностью.

Рассмотрим некоторые особенности фона и помех в данных условиях, а также предлагаемые подходы к выделению полезного сигнала в присутствии фона и помех. Выделение полезного сигнала от фона может быть облегчено, если учесть особенности распределения

гамма-квантов по времени образования в зависимости от их физической природы. Если принять за начало отсчета момент запуска первичного зондирующего протона, то гамма-кванты можно сортировать по времени их регистрации, основываясь на нижеизложенных физических принципах:

перед захватом в исследуемом объекте вещества нейтрон замедляется до тепловых энергий в ходе многократного взаимодействия с веществом;

как следствие, гамма-кванты от реакции захвата тепловых нейтронов, представляющие полезный сигнал, характеризуются временами порядка сотен микросекунд (время замедления нейтрона до тепловых энергий плюс время, необходимое далее для захвата теплового нейтрона);

гамма-кванты от исследуемой поверхности и атмосферы, образованные в результате других реакций, будут иметь, как правило, более ранние или же более поздние характерные времена и представляют собой фон;

более ранние времена ($t < \sim 10^{-6}$ с) обусловлены реакциями на быстрых нейтронах, не требующими замедления нейтронов, например, реакции (n, n') и $(n, 2n)$ [3];

более поздние времена ($t < \sim 10^{-3}$ с) обусловлены образующимися нестабильными изотопами [3].

В гамма-отклике, регистрируемом в интервале времени (10^{-6} с $< t < 10^{-3}$ с), присутствуют помехи от гамма-квантов, возникающих при захвате тепловых нейтронов в атмосфере. Эти гамма-кванты образуются в подавляющем большинстве на азоте и кислороде, как основных ее составляющих. В полученном энергетическом спектре азот и кислород отобразятся несколькими пиками с определенными известными энергиями, что может быть учтено при обработке информации.

Таким образом, если иметь импульсный источник протонов и детектировать гамма-сигнал в определенном временном интервале, то в соответствии с предложенным методом возможно получить хорошее соотношение сигнал/шум.

Сформируем предварительную схему практической реализации предложенного метода (рис. 1). Мобильный

ускоритель протонов размещается на борту летательного аппарата, например, вертолета. Исследуемая область облучается высокоэнергетическими протонами, которые способны пройти сотни метров через атмосферу без значительных потерь энергии. Как уже отмечалось, нейтроны образуются в воздухе при прохождении протонами расстояния от источника до исследуемого объекта, а также в самом зондируемом объекте.

В результате реакции радиационного захвата тепловых нейтронов в исследуемой области образуется гамма-отлик, который регистрируется детектором на борту летательного аппарата. По пикам и их интенсивности в полученном спектре можно судить о составе и концентрации различных элементов в исследуемой области. Предлагаемый метод определения элементарного состава приповерхностного объекта может быть использован для поисков различных полезных ископаемых, например, минералов, находящихся вблизи земной поверхности.

Прогностическое численное моделирование. Для проверки работоспособности предложенного метода было проведено численное моделирование методом Монте-Карло. Для моделирования и расчетов использовался программный комплекс GEANT4, предназначенный для использования при моделировании распространения частиц в веществе [6].



Рис. 1. Предварительная схема практической реализации активного метода дистанционной георазведки с использованием протонного ускорителя

В набор программных средств, входящих в пакет GEANT4, входят следующие модули: моделирование геометрии эксперимента; моделирование материалов, включая материалы регистрирующих детекторов; описание исследуемых частиц; генерация первичных событий моделирования; отслеживание перемещения частиц в материалах и электромагнитных полях; моделирование физических процессов взаимодействия между частицами; отклик компонент регистрирующих детекторов.

Для рассмотрения результатов расчетов с точки зрения прогнозирования эксперимен-

тальных данных важен учет всех составляющих фона и помех, возникающих в процессе измерений. При измерениях потоков и спектров гамма-квантов важную роль играют помехи, создаваемые гамма-квантами, испускаемыми целым рядом изотопов, возникающих в исследуемой зоне под действием каскадных частиц, порождаемых зондирующими пучком. Для учета этих помех в ходе проводившихся расчетов использовался специально разработанный программный модуль, подключаемый к программному комплексу GEANT4 и позволяющий учитывать запаздывающие нейтроны и гамма-кванты с энергиями > 100 кэВ от изотопов, образующихся в воздухе и материалах в зоне облучения. Всего в программном модуле учтено 264 изотопа, испускающих запаздывающие нейтроны, и 571 изотоп, испускающий гамма-кванты.

Для прогностического численного моделирования была использована схема поверхностного месторождения минералов железа. В качестве исходных данных взята известная модель поверхностного месторождения минералов железа в виде замещающих руд в массивах магматических пород [7] (рис. 2, а). В качестве железной руды рассматривается магнетит, в качестве магматической породы — гранит. На основе рис. 2, а была сформирована геометрия расчетной модели для моделирования с помощью программного комплекса GEANT4 (рис. 2, б).

Область поиска на земной поверхности моделировалась в виде прямоугольного гранитного параллелепипеда толщиной 50 м (поз. 1 на рис. 2, б). Исследуемый объем вещества представлен в виде куба со стороной 50 м (поз. 2), который находится внутри гранитного параллелепипеда. Этот куб может быть заполнен либо гранитом, либо магнетитом. Соответственно, были проведены два расчета. В первом случае материалом куба был магнетит, во втором — гранит.

Исследуемый объект облучался с высоты 100 м в указанных условиях протонами с энергией 250 МэВ (поз. 6). Пучок протонов был направлен строго вертикально по центру куба. Регистрация гамма-квантов осуществлялась в плоскостях на высотах 0, 50 и 100 м. Регистрировались только те гамма-кванты, вектор скорости которых в момент их регистрации детектором направлен от исследуемого куба вещества. Анализировались только

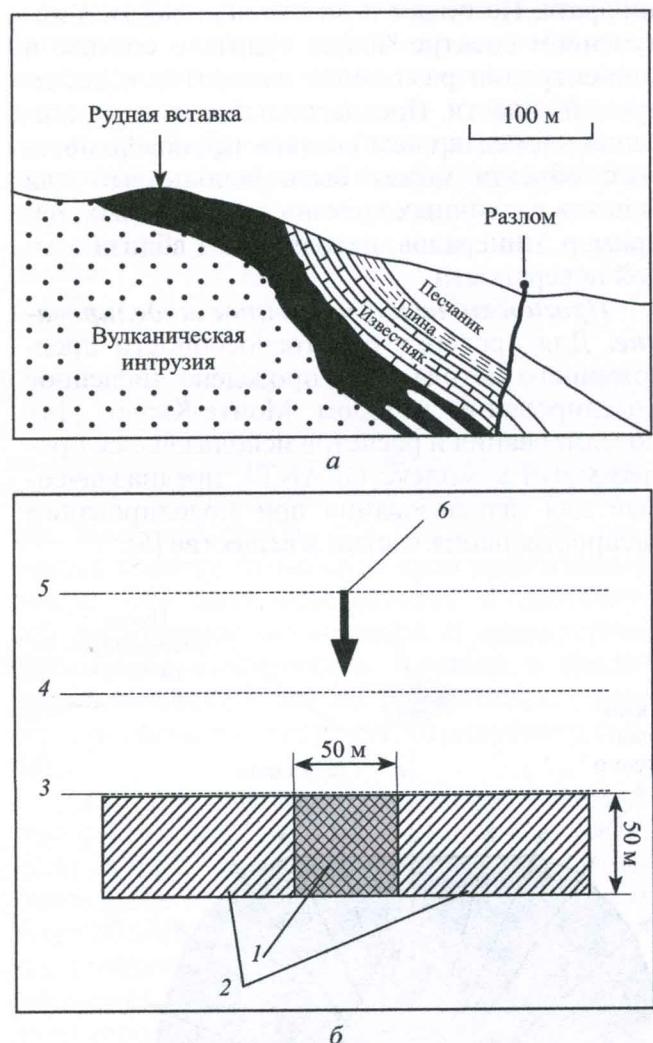


Рис. 2. Модель месторождения магнетита, используемая при моделировании (а) и ее моделируемая геометрия (б):

1 — исследуемый участок, состоящий из гранита либо магнетита; 2 — фоновый участок гранита; 3, 4, 5 — счетные плоскости детекторов на высотах 0; 50; 100 м соответственно; 6 — источник 250 МэВ-ных протонов на высоте 100 м

гамма-кванты, отстоящие от вертикальной оси на расстояние не более 25 м.

Результаты математического моделирования и их анализ. На рис. 3 приведены энергетические спектры гамма-квантов, полученные при моделировании для высот расположения детекторов 0; 50; 100 м. На рис. 3 по оси абсцисс отложена энергия гамма-кванта, а по оси ординат – количество гамма-квантов, проходящее через единицу площади детектора в расчете на один первичный протон.

В соответствии с изложенными выше принципами, при формировании спектра учитывались только гамма-кванты, относящиеся к временному интервалу (10^{-6} с $< t < \sim 10^{-3}$ с). Анализ результатов расчетов показал, что:

в случае, если исследуемый куб заполнен минералом магнетит, в энергетических гамма-спектрах наблюдаются характерные пики на энергиях 4,21798 МэВ, 5,92035 МэВ, 6,01842 МэВ, 7,63118 МэВ, 7,64558 МэВ, обусловленные излучением гамма-квантов при захвате тепловых нейтронов на ядрах железа [9];

характерная структура спектральных пиков не зависит от высоты расположения детектора (при увеличении высоты снижаются только интенсивности спектральных пиков).

Приведенный пример демонстрирует, что по структуре наблюдаемого энергетического гамма-спектра можно отличить участок зондируемой поверхности, под которым находится минерал магнетит, от фоновых участков, заполненных гранитом в случае рассмотренной простой геометрии эксперимента. Это подтверждает работоспособность предложенного метода ДЗ.

Заключение. Приведенные результаты численного моделирования продемонстрировали возможности предложенного метода дистанционного поиска минералов с определенным элементным составом с использованием в качестве зондирующего излучения высокогенергичных протонов. Показано, что сигнал-отклик может быть

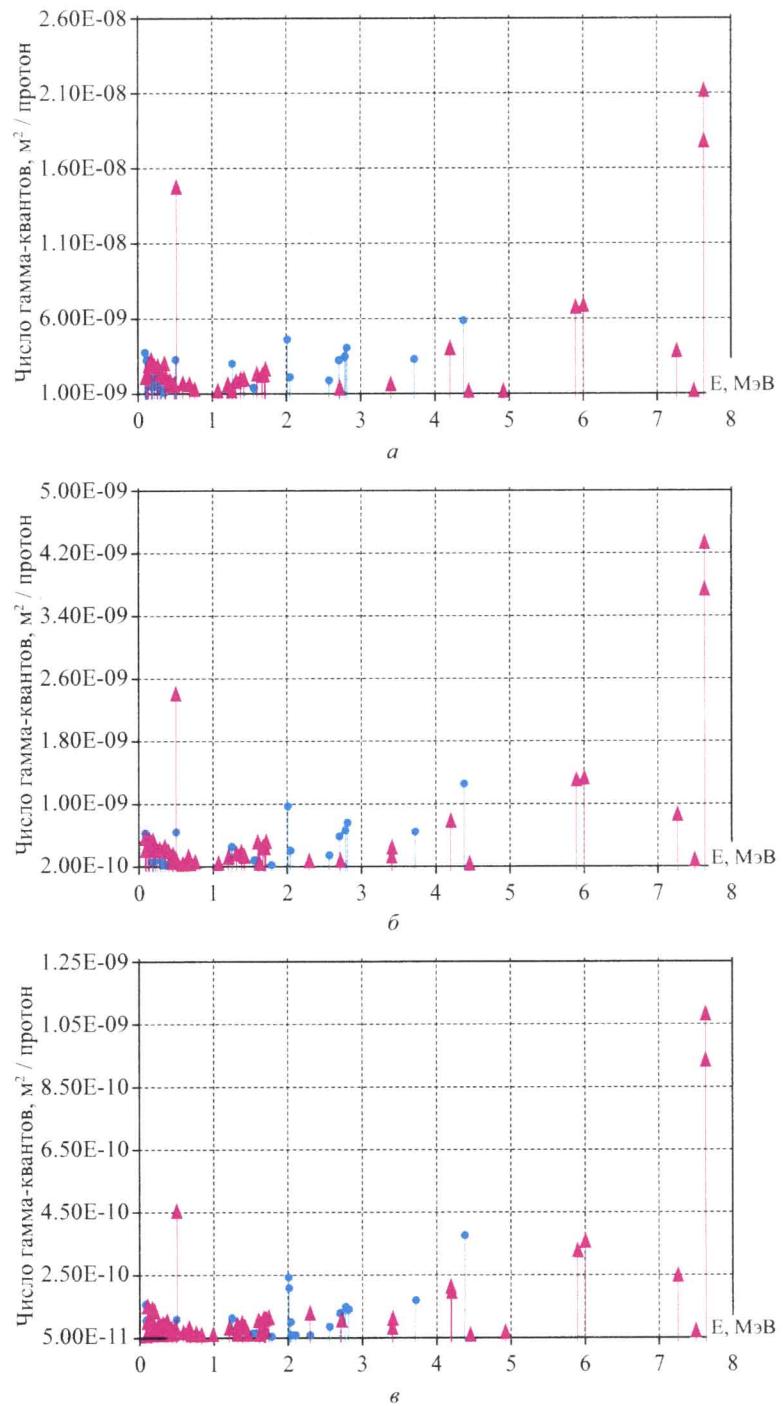


Рис. 3. Энергетические спектры гамма-излучения
(• — гранит, ▲ — магнетит) от исследуемого участка поверхности, регистрируемого детекторами на различных высотах:

а — $H=0$ м; б — $H=50$ м; в — $H=100$ м

зарегистрирован и отделен от фоновой компоненты благодаря сортировке гамма-квантов по времени образования. Доказана возможность уверенной регистрации характерных пиков в гамма-спектрах на различных высотах рас-

положения детектора. Таким образом, продемонстрирована принципиальная возможность применения предложенного метода для поиска минеральных ресурсов с размещением источников протонов и детекторов гамма-излучения на летательных аппаратах.

В ходе дальнейших исследований будет проведено прогностическое моделирование для более сложных условий. В ходе этих исследований будут рассмотрены возможности:

обнаружения других минералов с более сложным элементным составом;

выделения полезного сигнала в случае смешения искомых минералов, а также в случае более сложного состава фоновых минералов и при усложнении геометрии месторождения искомого минерала, в том числе при более глубоком залегании минерала;

комплексирования сигналов от гамма-квантов с сигналами от других элементарных частиц, в частности от нейtronов, рассеянных в исследуемом объекте, для повышения надежности распознавания области залегания искомых минералов.

Авторы выражают глубокую признательность доктору физ.-мат. наук, профессору А.М. Бакалярову за полезные консультации и практические советы по математическому моделированию методом Монте-Карло.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Kenneth Shultz *et al.*, Determining soil contamination profiles from intensities of capture-gamma rays using above-surface neutron sources, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University, Manhattan, KS 66506-2503, 1997.
2. Samuel R. Floyd *et al.*, "CHIRON" a proposed remote sensing prompt gamma ray activation analysis instrument for a nuclear powered prometheus mission, Lunar and Planetary Science XXXV, 2004.
3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: Учебник. В 3-х тт. 6-е изд., испр. и доп. - СПб.: Изд. «Лань», 2008.
4. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. - М.: Атомиздат, 1976.
5. Thermal Neutron Capture γ 's (CapGam). National Nuclear Data Center (NNDC) resource <http://www.nndc.bnl.gov/capgam/>.
6. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytracek, G. Cooperman *et al.* GEANT4—a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 506, Issue 3, 1 July 2003, Pages 250-303
7. GEANT4. Testing and Validation. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/results/results.shtml>.
8. Introduction to mineral exploration. – 2nd ed. Edited by Charles J. Moon, Micheal E.G. Whateley, and Anthony M. Evans with contributions from William L. Barrett [et. al]. Blackwell publishing, 2006.
9. National Nuclear Data Center <http://www.nndc.bnl.gov/capgam/byn/page058.html>

Поступила 11 февраля 2010 г.
Рекомендована кафедрой аэрокосмических съемок
МИИГАиК

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Профессор, кандидат техн. наук **И.А. Миртова**, аспирант **А.А. Берюлев**

Московский государственный университет геодезии и картографии

тел: 8 (499) 267-2618

Аннотация. Рассматривается важность аэрокосмического мониторинга для анализа взаимодействия природных процессов и инженерных сооружений, приводятся примеры негативного влияния природных процессов на антропогенные объекты на территории полуострова Ямал, подчеркивается важность создания геоинформационных систем для организации аэрокосмического мониторинга исследуемых территорий.

Ключевые слова: нарушенные земли, аэрокосмический мониторинг; дешифровочные признаки

Abstract. The importance of space monitoring for the analysis of interaction of natural processes and engineering structures is considered, the examples of natural processes negative influence on man-made objects on Yamal territory are given, the importance of creation of geoinformation systems for the investigated territories' space monitoring organization.

Keywords: disturbed lands, deciphering features, airspace monitoring

В Ямalo-Ненецком регионе добывается около 87% российского и более 20% мирового газа. Добыча ведётся на 25 разведанных ме-

сторождениях. Недавно в Пуровском районе был введен в эксплуатацию первый на Ямале завод по переработке газового конденсата. В