



Применение комплекса геолого-геофизических методов для поиска воды в засушливых районах Южной Африки (о. Мадагаскар). Обследование мааровых структур.

Application of a complex of geological and geophysical methods for the search for water in arid regions of South Africa (Madagascar Island). Examination of maar structures.

И.В.Зуйков* (ООО «Аль Терра», Россия), Mark Burr (Primary Water Technologies LLC, USA), Ю.С. Погорелов (Белгородский национальный исследовательский университет)

I.Zuikov * (Al Terra LLC, Russia), Mark Burr (Primary Water Technologies LLC, USA), Yu.S. Pogorelov (Belgorod National Research University)

Введение / Introduction

Во многих станах мира в последние годы проблема чистой питьевой воды становится главнейшей проблемой обеспечения существования и жизнедеятельности населения. По данным ООН, через 7 лет питьевой водой будет обеспечена лишь половина населения планеты. Особенно это касается стран Ближнего Востока и Африки. Не исключением является и Мадагаскар, в южных частях которого, по данным ЮНИСЕФ, лишь около 25% из 12-ти миллионного населения имеют доступ к воде приемлемого качества. В связи с этим, в 2017-м году Министерством водного хозяйства, санитарии и гигиены Мадагаскара была запланирована программа обеспечения населения южных районов страны питьевой водой. Программой предусматривались работы как по поиску источников водоснабжения геолого-геофизическими методами, так и бурение вододобывающих скважин по выделенным перспективным участкам.

In many countries of the world in recent years the problem of clean drinking water has become the main problem of ensuring the existence and livelihoods of the population. According to the UN, in 7 years only half of the world's population will be provided with drinking water. This is especially true in the Middle East and Africa. Madagascar is not an exception, in the southern parts of which, according to UNICEF, only about 25% of 12 million people have access to water of acceptable quality. In this regard, in 2017 the Ministry of Water, Sanitation and Hygiene of Madagascar planned a program to provide the population of the southern regions of the country with drinking water. The program envisaged work on finding sources of water supply by geological and geophysical methods, as well as drilling water-producing wells in selected promising areas.

Для решения поставленных задач необходимо было выделить участки для проведения детальных наземных исследований, а затем - выполнение на выделенных участках комплексных геофизических работ. Комплекс геофизических исследований должен был обеспечить выполнение работ в кратчайшие сроки, быть достаточно простым для освоения (в дальнейшем работы планировалось выполнять силами местных специалистов), а также давать высоковероятностный результат. Планируемая глубинность исследований составляла 200 метров. В результате конкурса для проведения работ были выбраны методы:

To solve the tasks, it was necessary to allocate sites for detailed ground investigations, and then - to carry out complex geophysical works on selected sites. The complex of geophysical studies was supposed to ensure the execution of works in the shortest possible time, to be simple enough for mastering (later it was planned to perform the work by local specialists), and also to give a highly probable result. The planned depth of research was 200 meters. As a result of the competition, the following methods were chosen for the work:

- дешифрирование данных космических съемок (для выделения перспективных для наземных исследований участков) [interpretation of satellite survey data (to identify areas that are promising for terrestrial research)]





- наземная радиометрическая (гамма) съемка (для выделения участков потенциального обводнения) [ground-based radiometric (gamma) survey (to identify areas of potential aquifer)]

- пассивная сейсморазведка (метод Резонансно-Акустического Профилирования) – для определения структурного разреза, определения наиболее перспективных точек и глубин для бурения скважин [passive seismic (method of Resonance-Acoustic Profiling) - to determine the structural section, determine the most promising points and depths for drilling wells]

Работы выполнялись в ноябре – декабре 2017 года консорциумом в составе Primary Water Technologies LLC, USA (дешифрирование космических снимков и полевые работы РАП), Transformative Technologies, Mauritius (пешеходная гамма-съемка), ООО «Аль Терра», Россия (полевые работы РАП и комплексная обработка данных).

The work was carried out in November-December 2017 by a consortium of Primary Water Technologies LLC, USA (decoding of space images and fieldwork of the RAP), Transformative Technologies, Mauritius (ground gamma survey), Al Terra LLC, Russia (fieldwork of the RAP and complex data processing).

Применяемые методы и методика выполнения paбor / Applied methods and methods of work execution

Источники водоснабжения южной части Мадагаскара представлены двумя основными типами подземных вод. Это первый водонасыщенный горизонт, расположенный на глубинах 10 – 20 метров от поверхности (в зависимости от региона) и приуроченный к нижней границе четвертичных отложений. В подавляющем большинстве случаев этот горизонт сильно минерализован и не может использоваться как источник питьевой воды. Второй тип – трещинные воды. Трещинные воды приурочены к зонам тектонических нарушений глубинного заложения, по которым, как по капиллярам, чистая вода поднимается из глубин Земли к поверхности. Этот тип является наиболее перспективным для южных районов Мадагаскара, и именно он являлся поисковым объектом для проводимых работ.

The sources of water supply in the southern part of Madagascar are represented by two main types of groundwater. This is the first water-saturated horizon located at depths of 10-20 meters from the surface (depending on the region) and confined to the lower boundary of the Quaternary sediments. In the overwhelming majority of cases, this horizon is highly mineralized and cannot be used as a source of drinking water. The second type is fissure water. Fissure waters are confined to zones of tectonic disturbances of deep deposition, along which, as in capillaries, clean water rises from the depths of the Earth to the surface. This type is the most promising for the southern regions of Madagascar, and it was the target of the exploration phase and ongoing work.

Для выделения площадок для детальных наземных исследований на предварительном этапе работ был выполнен линеаментный анализ данных космической съемки. Анализ выполнялся как в автоматическом (с использованием специального программного обеспечения), так и в ручном режиме специалистами компаний HydroSource Associates, Inc. и Primary Water Technologies LLC, обе – США, экспертами в области обработки данных космических съемок.

To isolate sites for detailed ground-based research, a linear analysis of satellite survey data was carried out at a preliminary stage of the work. The analysis was performed both in automatic (using special software) and in manual mode by specialists of HydroSource Associates, Inc. and Primary Water Technologies LLC, both of the United States, experts in the field of processing satellite survey data.





Карта линеаментов



Рисунок 1 Пример карты линеаментов, выделенных по результатам дешифрирования данных космических съемок. Разными цветами показаны линеаменты, выделенные при помощи различных алгоритмов дешифрирования. [Figure 1 An example of a map of lineaments extracted from the results of interpretation of satellite imagery. Different colors show lineaments selected with the help of various algorithms for deciphering]

Впоследствии карта выделенных линеаментов (рис. 1) с привязанными координатами выносилась на карту Google и переносилась в GPS навигатор. Наиболее перспективными считались зоны, выделенные по нескольким алгоритмам, а также участки пересечения нескольких линейных зон.

Мааровые структуры

Рисунок 2 Мааровые структуры, вид из космоса. Красная линия – линеамент по данным космической съемки, черными стрелками – маары (по данным специалистов Primary Water Technologies). [Figure 2 Maar structures, viewed from satellite imagery. The red line is a lineament based on lineament data, black arrows are maars (according to specialists from Primary Water Technologies).]





Subsequently, the map of the selected lineaments (Fig. 1) with the attached coordinates was transferred to a Google map and transferred to a GPS navigator. The most promising were the zones identified by several algorithms, as well as the intersections of several linear zones.

В процессе рекогносцировки на местности в районах выделенных перспективных зон были обнаружены структуры, идентифицированные специалистами Primary Water Technologies как мааровые (рис. 2). Маары - плоскодонные кратеры взрыва без конуса, окруженные невысоким валом из рыхлых продуктов извержения, иногда заполнены водой. Образуются на земной поверхности при однократном газовом взрыве, не сопровождавшемся излиянием лавы, когда грунтовые воды контактируют с разогретыми породами [1].

In the process of reconnaissance on the ground in areas of identified promising zones, structures identified by specialists of Primary Water Technologies as maar were found (Fig. 2). Maars - flatbottomed craters of a [volcanic] explosion without a cone, surrounded by a low shaft of loose eruption products, are sometimes filled with water. Formed on the earth's surface with a single gas explosion, not accompanied by the outpouring of lava, when ground waters are in contact with heated rocks [1].

Известно, что маары, как правило, обладают повышенным водонасыщением, что вместе с наличием вертикального канала глубинного заложения, сопряженного с зоной тектонического нарушения, позволило считать их первоочередными структурами для наземного изучения.

It is known that maars, as a rule, have an increased water saturation, which together with the presence of a vertical deep channel [diatreme] associated with the zone of tectonic disturbance, has made it possible to consider them as the primary structures for ground-based study.

Для первичного обследования перспективных участков на земле и предварительного выделения эпицентра зоны потенциального водонасыщения в процессе работ применялась радиометрическая (гамма) съемка, выполненная специалистами Transformative Technologies, Маврикий. Предпосылками для применения данного вида обследований явился известный эффект поглощения и частичного блокирования водой гамма-излучения, в связи с чем потенциально водонасыщенные участки выделяются понижением интенсивности гамма-излучения. Кроме этого, по интенсивности гамма-излучения можно выполнять и трассирование зон тектонических нарушений (рис. 3). Для выполнения работ использовался радиометр-спектрометр G-Explorer (рис.3) компании ROM-Elektronik (Германия).



Инженерная и рудная геофизика 2018 — Алматы, Казахстан, 23-27 апреля 2018 г.





Рисунок 3 Радиометр-спектрометр G-Explorer компании ROM-Elektronik (слева) и результаты его применения для трассирования зон тектонических нарушений (справа). [**Figure 3** The ROM-Elektronik G-Explorer radiometer-spectrometer (left) and the results of its application for tracing tectonic disturbance zones (right).]

For initial examination of promising areas on the ground and preliminary allocation of the epicenter of the potential water saturation zone, a radiometric (gamma) survey was performed by specialists of Transformative Technologies, Mauritius. The prerequisites for the application of this kind of surveys were the known effect of absorption and partial blocking of gamma radiation by water, and therefore potentially water-saturated areas are distinguished by a decrease in the intensity of gamma radiation. In addition, the intensity of gamma radiation can also be performed by tracing zones of tectonic disturbances (Figure 3). To perform the work, the radiometer-spectrometer G-Explorer (Fig. 3) of ROM-Elektronik (Germany) was used.

Отличительными особенностями данного радиометра являются высокая точность (за счет использования сцинтилляционного датчика большого объема), возможность работы в ручном и автоматическом режиме, жидкокристаллический экран с возможностью визуализации графика и величин измеряемых параметров в процессе движения, а также наличие встроенной системы GPS-навигации. Непосредственно после измерений записанные данные можно посмотреть на компьютере в программе Google Earth.

The distinctive features of this radiometer are high accuracy (using a large scintillation sensor), the ability to work in manual and automatic mode, a liquid crystal screen with the ability to visualize the graph and the values of the measured parameters during the movement, and the presence of an integrated GPS navigation system. Immediately after the measurements, the recorded data can be viewed on a computer in the Google Earth program.

Измерения выполнялись в пешеходном режиме с дискретностью записи интенсивности гаммаизлучения и координат, равной 10-ти секундам. Оператор выполнял рекогносцировку выделенного по результатам дешифрирования космических снимков участка, выделял зону с минимальными интенсивностями гамма-излучения, а затем выделенная зона захаживалась серией параллельных маршрутов. Предварительно, прямо на участке, выполнялся сброс записанных данных на компьютер и построение карты изолиний интенсивности гаммаизлучения в программе Surfer (Golden Software), как показано на иллюстрации ниже (рис. 4).

The measurements were carried out in a pedestrian mode with a discreteness of recording the intensity of gamma radiation and the coordinates, equal to 10 seconds. The operator carried out a reconnaissance of the site selected for the interpretation of the space images, identified a zone with minimal gamma-ray intensities, and then the allocated zone was visited by a series of parallel routes. Beforehand, right on the site, the recorded data was downloaded to the computer and the gamma radiation intensity isolines map was created in the Surfer software (Golden Software), as shown in the figure below (Figure 4).





Радиометрическая съемка



Рисунок 4 Методика выполнения (слева) и результаты (карта изолиний интенсивности гамма-излучения, справа) пешеходной гамма-съемки по одному из участков работ. [Figure 4 Execution method (left) and results (map of isolines of gamma radiation intensity, on the right) of pedestrian gamma survey for one of the work sections.]

Эпицентр выделенной радиометрической аномалии фиксировался на местности для планирования проведения дальнейших геофизических исследований.

The epicenter of the allocated radiometric anomaly was recorded on the ground for planning further geophysical studies.

На завершающем этапе наземной детализации выделенных перспективных участков для определения структурного разреза, определения наиболее перспективных точек и глубин для бурения скважин применялся метод Резонансно-Акустического Профилирования (РАП) [4].

At the final stage of ground detailing of the selected perspective sections, the Resonance-Acoustic Profiling (RAP) method was used to determine the structural section, determine the most promising points and depths for drilling wells [4].

Метод РАП использует для получения информации стоячие волны, возникающие в толще горных пород под воздействием различных источников. В настоящее время существует несколько методов, использующих для получения информации стоячие волны. Известный способ динамических испытаний зданий и сооружений основан на возбуждении стоячих волн искусственными источниками колебаний, где на основании полученных спектров делаются выводы о сейсмостойкости здания, а также о его состоянии и степени износа. Кроме этого, существует метод пассивных стоячих волн [3], используемый сегодня, в основном, для решения инженерных задач. Метод пассивных стоячих волн использует в качестве источника информации стоячие волны, возникающие под воздействием шумового поля микросейсм, позволяя выделять механические неоднородности в геологическом разрезе. Частота стоячей волны связана с глубиной залегания отражающей границы формулами:

$$f_{n=\frac{n*Vp}{2h}} \tag{1}$$





или
$$f_{n=\frac{(2n-1)*Vp}{4h}}$$
 (2)

, где n – номер моды, h – глубина залегания отражающей границы, Vp – скорость продольной волны в слое формирования стоячей волны.

The RAP method uses static waves that arise in the thickness of rocks under the influence of various sources to obtain information. At present, there are several methods that use static waves to obtain information. The known method of dynamic testing of buildings and structures is based on the excitation of standing waves by artificial sources of oscillations, where on the basis of the obtained spectra conclusions are drawn about the earthquake resistance of the building, as well as its condition and degree of deterioration. In addition, there is a method of passive standing waves [3], used today, mainly to solve engineering problems. The method of passive standing waves uses standing waves as a source of information, arising under the influence of the noise field of microseisms, allowing to isolate mechanical inhomogeneities in the geological section. The frequency of a standing wave is related to the depth of the reflecting boundary: [See formulas above], where n is the mode number, h is the depth of the reflecting boundary, and Vp is the velocity of the longitudinal wave in the standing wave formation layer.

Формула (1) применима в случае, когда одна из отражающих границ является границей со слоем с более высоким волновым сопротивлением, формула (2) – когда формирование стоячей волны происходит между «свободными» границами (контакт типа «твердая среда – воздух»). Амплитуда стоячей волны зависит от «контрастности» контактирующих слоев. Чем контрастнее граница, формирующая отражение и образование встречной волны – тем выше амплитуда возникающей стоячей волны.

Formula (1) is applicable in the case where one of the reflecting boundaries is a boundary with a layer with a higher wave resistance; formula (2) when the formation of a standing wave occurs between "free" boundaries (solid-air contact). The amplitude of a standing wave depends on the "contrast" of the contacting layers. The more contrast the boundary forming the reflection and the formation of the opposing wave, the higher the amplitude of the emerging standing wave.

Первые попытки обосновать теорию метода РАП были предприняты в 2013 году специалистами компании ООО «Аль Терра» совместно с венгерским физиком М. Варга (М. Varga), разработавшим программу математического моделирования микросейсм от множественных удаленных источников с использованием алгоритма, предложенного Д. Альбарелло (D. Albarello). Пример работы программы для двухслойного разреза можно увидеть ниже (рис.5)







Рисунок 5 Результат работы программы COMPLETA (M.Varga). Сравнение амплитуд спектров вертикальной и горизонтальной компонент с отношением спектральных амплитуд акустического волнового поля [**Figure 5** The result of the program COMPLETA (M.Varga). Comparison of the amplitudes of the spectra of the vertical and horizontal components with the ratio of the spectral amplitudes of the acoustic wave field]

The first attempts to justify the theory of the RAP method were taken in 2013 by the specialists of Al Terra LLC together with the Hungarian physicist M. Varga, who developed a program for mathematical modeling of microseisms from multiple remote sources using the algorithm proposed by D. Albarello. An example of how a program works for a two-layered section can be seen above (Fig. 5)

Как видно по иллюстрации, что при наличии контрастной границы изменения свойств пород положение границы раздела слоев проявляется как на спектре горизонтальной, так и вертикальной компонент акустического волнового поля, однако амплитуда вертикальной компоненты спектра акустического сигнала (измеряемой методом РАП) выше, чем амплитуда горизонтальной составляющей. В результате работы с программой COMPLETA также был подтвержден и ряд других положений метода РАП:

As can be seen from the illustration, in the presence of the contrast boundary of the change in the properties of the rocks, the position of the interface of the layers manifests itself both on the spectrum of the horizontal and vertical components of the acoustic wave field, however, the amplitude of the vertical component of the acoustic signal spectrum (measured by the RAP method) is higher than the amplitude of the horizontal component. As a result of working with the COMPLETA program, a number of other provisions of the RAP method were also confirmed:

- 1. При изменении глубины границ раздела сред изменяются и положения спектральных максимумов, которые смещаются в сторону более низких частот при увеличении глубины [When the depth of media interface changes, the positions of the spectral maxima change, which shift towards lower frequencies with increasing depth]
- 2. При изменении скоростных характеристик слоев разреза положение спектральных максимумов практически не изменяется [When the velocity characteristics of the cut layers change, the position of the spectral maxima remains practically unchanged]
- 3. При наличии в разрезе слоя с низкими скоростными характеристиками (слоя с пониженными прочностными свойствами) амплитуда спектра вертикальной компоненты волнового поля резко возрастает. [In the presence of a layer with low velocity characteristics (a layer with reduced strength properties), the amplitude of the spectrum of the vertical component of the wave field increases sharply.]

Именно последнее позволяет применять метод РАП при выделении в разрезе участков с пониженными скоростными характеристиками – участков ослабления механической прочности пород (повышенной пористости и трещиноватости пород геологического разреза).

It is the latter that makes it possible to use the RAP method when isolating sections with reduced velocity characteristics - sections of weakening of the mechanical strength of rocks (increased porosity and fissuring of the rocks of the geological section).

Метод РАП использует для получения информации как пассивные стоячие волны, образующиеся в результате отражения волн, формирующихся микросейсмами (низкие частоты), так и стоячие волны, возбужденные легким ударным воздействием в точке приема сигнала (высокие частоты). Результаты физического и математического моделирования,





(Белгородский национальный исследовательский выполненного Ю.С. Погореловым университет) в ноябре – декабре 2017-го года, подтвердили возможность формирования стоячих волн сжатия – растяжения как под действием поля микросейсм, так и под влиянием внешнего возбуждения. Границами, между которыми формируются фиксируемые стоячие волны, является поверхность наблюдений (верхняя граница) и поверхность ослабленного механического контакта пород (зона резкого изменения скоростей – нижняя граница). Так как верхней границей формирования стоячих волн является поверхность наблюдений, то есть зона контакта типа «вещество – воздух», то в зоне контакта датчика наблюдается пучность, то есть - точка максимальных амплитуд стоячей волны. Чем глубже залегает нижняя отражающая граница – тем ниже частота возникающей стоячей волны. Зная скорость продольной волны в изучаемом слое и вычислив частоту принимаемых датчиком колебаний – можно определить глубину нижней отражающей границы. Однако, на практике редко имеется возможность точного определения скоростей продольных волн в изучаемом разрезе, к тому же – небольшие искажения вносит и датчик акустических колебаний, применяемый при полевых наблюдениях. В связи с этим определение глубин при работах методом РАП выполняется с использованием коэффициента пересчета, определяемого по результатам параметрических наблюдений на скважине с известным геологическим разрезом, расположенной в районе проведения работ. Либо – корректировка глубины производится в процессе бурения по результатам РАП при подсечении скважиной первых границ с контрастной зоной контакта.



Рисунок 6 Выполнение полевых наблюдений методом РАП. [Figure 6 Field observation by the RAP method.]

The method of RAP to obtain information uses passive static waves, formed as a result of reflection of waves formed by microseisms (low frequencies), and static waves excited by a light shock at the signal receiving point (high frequencies). Results of physical and mathematical modeling performed by Yu.S. Pogorelov (Belgorod National Research University) in November - December 2017, confirmed the possibility of forming standing waves of compression-tension both under the action of the microseism field and under the influence of external excitation. The boundaries between which the fixed standing waves are formed are the surface of observations (the upper boundary) and the surface of the weakened mechanical contact of the rocks (the zone of sharp changes in velocities is the lower boundary). Since the upper limit of the formation of standing waves is the surface of observations, that is, the contact zone of the "substance-air" type, an antinode is observed in the contact zone of the sensor, that is, the point of maximum amplitudes of the static wave. Knowing the velocity of the longitudinal wave in the layer under study and calculating the frequency of the oscillations received

EAGE



by the sensor, it is possible to determine the depth of the lower reflecting boundary. However, in practice, it is rarely possible to accurately determine the velocities of longitudinal waves in the section under study; in addition, small distortions are also introduced by the acoustic oscillation sensor used in field observations. In this connection, the determination of depths in the work of the RAP method is performed using the conversion factor determined from the results of parametric observations at a well with a known geological section located in the work area. Or, the depth correction is made during the drilling process based on the results of the RAP when the bore bisects the first border with the contrast contact zone.

Наблюдения методом РАП заключаются в перемещении оператора с аппаратурой по профилям наблюдений (рис. 6), записи акустических сигналов в точках наблюдений с заданным шагом. При работах на Мадагаскаре использовались расстояния между точками наблюдений 5 и 10 м (в зависимости от размеров объекта исследований). Так как, в основном, объекты исследований имели изометрическую форму, то при отработке участков применялась методика, хорошо зарекомендовавшая себя при работах на кимберлитовых трубках Архангельской области (рис. 7).

Observations by the RAP method consist in moving the operator with the equipment along the observation profiles (Figure 6), recording acoustic signals at observation points with a given step. When working in Madagascar, distances between observation points of 5 and 10 m were used (depending on the size of the object of research). Since, in general, the objects of research had an isometric form, then during the development of the sites, a technique was used which proved to be very useful when working on kimberlite pipes in the Arkhangelsk region (Fig. 7).



Рисунок 7 Пример выделения зоны контакта изометрического в плане объекта (кимберлитовая трубка) по интенсивности спектра акустического сигнала. Слева – выделение зоны контакта по отдельным профильным наблюдениям, справа – картирование зоны контакта по группе профилей. [Figure 7 An example of isolating the contact zone of an isometric object in the plan (kimberlite tube) according to the intensity of the acoustic signal spectrum. On the left, the selection of the contact zone for individual profile observations; on the right, mapping of the contact zone along the profile group.]





Как видно по иллюстрации (рис. 7), зона резкого механического контакта изометрических в плане объектов с вмещающими породами однозначно выделяется повышением амплитуды спектров акустических сигналов. Лучший результат получается при прохождении профиля вкрест выделяемой границе. Исходя из этого, при проведении работ в южной части о. Мадагаскар линии РАП-наблюдений располагались «звёздочкой» с серединой в геометрическом центре выделенной по радиометрическим данным аномалии (рис. 8).



Рисунок 8 Задание профилей РАП-наблюдений (справа) по результатам радиометрической съемки (слева). [Figure 8 Setting the profiles of RAP observations (right) based on radiometric survey results (left).]

As can be seen from the illustration (Figure 7), the zone of sharp mechanical contact of isometric objects with enclosing rocks is uniquely distinguished by an increase in the amplitude of the spectra of the acoustic signals. The best result is obtained when the profile crosses the allocated border. Proceeding from this, when carrying out work in the southern part of Madagascar lines of RAP observations were located "asterisk" with the middle in the geometric center of the radiometric data anomaly (Fig. 8).

Основной задачей обработки результатов работ методом РАП является выделение и локализация участков аномального повышения амплитуд спектров акустических сигналов. Первым этапом обработки является вычисление спектров полученных акустических сигналов (БПФ с оконной функцией Уэлча), и пересчет частот полученных спектров в глубины, в соответствии с формулой и коэффициентом пересчета, установленным для данного участка. Для более точного выделения экстремальных значений спектров акустических сигналов, которые соответствуют поверхностям ослабленного механического контакта, вычисляется локальная (остаточная) составляющая спектра. Затем, для более четкой визуализации поверхностей ослабленного механического контакта, производится сложение полученных результатов вычислений по полной компоненте спектра акустического сигнала и по локальной его компоненте.

The main task of processing the results of works using the RAP method is to isolate and localize areas of anomalous amplification of the acoustic signal spectra. The first stage of the processing is the calculation of the spectra of the received acoustic signals (DFT with the Welch window function) and recalculation of the frequencies of the obtained spectra into depths, in accordance with the formula and the conversion factor established for this section. To more accurately isolate the extreme values of the spectra of acoustic signals that correspond to the surfaces of a weakened mechanical contact, the local (residual) component of the spectrum is calculated.

EAGE



Then, for a clearer visualization of the surfaces of the weakened mechanical contact, the obtained results of the calculations are added along the full component of the acoustic signal spectrum and along its local component.

Результаты наблюдений, как правило, представляются как растровое изображение амплитуд преобразованного в спектральный вид акустического сигнала. Цветовая шкала соответствия амплитуд спектров определенных цветам создается одинаковой для всех профилей одного участка, чтобы визуально можно было оценить и сравнить амплитуды по различным профилям наблюдений. Так как амплитуда спектра стоячих волн напрямую связана со степенью механического ослабления пород, контактирующих по какой-либо границе, то разрезы, получаемые в результате обработки, фактически являются картой изолиний относительной механической прочности пород изучаемого разреза, где более слабым участкам (участки повышенного расслоения пород, зон трещиноватости, участки обводнения, зоны тектонических нарушений, различные структурные комплексы пород либо поверхности их контакта и т.д.) отвечают более интенсивные цвета. Следовательно, они могут быть выделены на РАП-разрезах именно по повышенной насыщенности и интенсивности цветовой гаммы [2].

The results of observations, as a rule, are represented as a raster image of the amplitudes of the acoustic signal transformed into a spectral form. The color scale of the correspondence of the amplitude of the spectra to certain colors is created identical for all profiles of one section in order to visually be able to estimate and compare the amplitudes for different observation profiles. Since the amplitude of the standing wave spectrum is directly related to the degree of mechanical weakening of rocks contacting at any boundary, the cuts resulting from the processing are in fact an isoline map of the relative mechanical strength of the rocks of the section under study, where weaker sections (areas of increased stratification of rocks, zones of fracturing, watering areas, zones of tectonic disturbances, various structural complexes of rocks or their contact surfaces, etc.), more intense colors respond. Consequently, they can be distinguished on the RAP-sections precisely because of the increased saturation and intensity of the color scale [2].

Результаты выполненных работ / Results of work performed

Пример результатов, полученных по некоторым профилям наблюдений методом РАП, можно увидеть на иллюстрации ниже (рис. 9).



An example of the results obtained for certain observational profiles by the RAP method can be seen in the illustration above (Figure 9).





Рисунок 9 Результаты работ методом РАП по двум профилям отработанного участка. Более интенсивные цвета соответствуют большим амплитудам спектров акустических сигналов, следовательно – породам с меньшей механической прочностью (потенциально водонасыщенным). [**Figure 9** Results of works by the method of RAP for two profiles of the project section. More intense colors correspond to larger amplitudes of the spectra of acoustic signals; hence, to rocks with less mechanical strength (potentially water-saturated).]

Как видно по представленной выше иллюстрации, по разрезам РАП выделяется несколько зон повышения амплитуд спектров акустических сигналов, которые могут быть интерпретированы как потенциально перспективные для поисков воды. Субгоризонтальная зона, расположенная на глубинах 20 – 30 метров, соответствует (по данным геологов компании BushProof, Magarackap) первому водонасыщенному горизонту, с очень большой вероятностью – сильно минерализованному (засоленному). Глубже по разрезу отмечается еще одна зона экстремальных амплитуд спектров, расположенная на глубинах от 120 метров от поверхности. Зона уверенно фиксируется по всем профилям наблюдений, что подтверждает ее достоверность. Подобные результаты были получены и по другим обследованным участкам.

As can be seen from the above illustration, several zones of increasing amplitudes of the spectra of acoustic signals are distinguished from the RAP profiles, which can be interpreted as potentially promising for water exploration. The subhorizontal zone, located at depths of 20-30 meters, corresponds (according to the geologists of BushProof, Madagascar) to the first water-saturated horizon, with very high probability of high salinity. Deeper in the section there is another zone of extreme amplitude of the spectra, located at depths of 120 meters from the surface. The zone is confidently fixed in all observation profiles, which confirms its reliability. Similar results were obtained for other surveyed sites.

Всего за время проведения полевых работ (2 недели) было обследовано 15 участков в разных районах южного Мадагаскара. Наиболее перспективные из них (4 участка) были переданы под бурение, которое планируется провести в феврале – марте 2018 года, после окончания сезона дождей. Пример рекомендаций можно увидеть на иллюстрации ниже (рис. 10)



Рисунок 10 Пример выделения перспективной зоны потенциального водонасыщения по одному из участков проведенных работ с рекомендованным местом и глубиной бурения водозаборной скважины. [Figure 10 An example of highlighting a prospective potential water saturation zone along one of the sections of the work performed with the recommended location and depth of drilling of the water well.]





Выводы / Conclusions

Выполнение работ по поискам воды в южных районах о. Мадагаскар показало работоспособность и конкурентоспособность применяемого комплекса геолого-геофизических работ, состоящих из линеаментного анализа, радиометрической гамма-съемки и метода резонансно-акустического профилирования. Заказчиком отмечена высокая мобильность комплекса, хорошая скорость выполнения наземных работ (за 1 рабочий день, в среднем, выполнялись 1 – 2 участка общей площадью несколько гектаров), скорость получения, а также однозначность и сходимость получаемых результатов. Все виды наземных геофизических работ выполнялись сотрудниками местных геофизических служб (после непродолжительного обучения), что говорит о простоте применяемых методов.

Performing works to find water in the southern regions of Madagascar showed the efficiency and competitiveness of the applied complex of geological and geophysical works, consisting of lineament analysis, radiometric gamma survey and the method of resonance-acoustic profiling. The customer noted the high mobility of the exploration team, a good rate of ground operations (1 to 2 sections with a total area of several hectares per 1 working day), the speed of processing and reports, and the unambiguity and convergence of the results obtained. All methods of ground geophysical surveys were carried out by the staff of local geophysical team (after a short training), which indicates the simplicity of the methods used.

На территории проводимых работ выявлены и определены как перспективные для поисков воды объекты предположительно маарового типа. Окончательную природы выделенных объектов можно будет определить по результатам бурения.

On the territory of the works carried out, objects of presumably maar-type have been discovered and identified as promising for water exploitation. The final nature of the selected objects can be determined by the results of drilling.

По результатам проведения работ Заказчиком принято решение о продолжении наземных геофизических работ после получения положительных результатов бурения скважин. А статистика применения метода на территориях со схожими проблемами как в России, так и за рубежом (Монголия, Йемен, Марокко и др.) позволяют надеяться именно на положительный результат бурения и на Мадагаскаре.

Based on the results of the work, the Customer decided to continue ground geophysical work after obtaining positive results of drilling wells. And the statistics of the application of the method in territories with similar problems both in Russia and abroad (Mongolia, Yemen, Morocco, etc.) make it possible to hope for a positive drilling result in Madagascar.

Благодарности / Acknowledgements

Авторы выражают благодарности руководству компании BushProof (Антананариву, Мадагаскар), обеспечившие организацию выполнения полевых работ.

The authors express their gratitude to the management of BushProof (Antananarivo, Madagascar), who provided the organization of field work.

Библиография / Bibliography

1. Арсланова Х.А., Голубчина М.Н. и др., Геологический словарь: *в* 2-х томах под ред.К.Н. Паффенгольца. — 2-е изд., испр. / М.: Недра, 1978, Том 1 стр. 402





- 2. Зуйков И.В., Бединов В.В., Применение метода Резонансно-Акустического Профилирования при проведении инженерно-геологических изысканий / Инженерные изыскания 2011 № 11- с. 52 58
- 3. Колесников Ю.И., Федин К.В., Обнаружение подземных пустот по микросейсмам: физическое моделирование / ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Технологии сейсморазведки, № 4, 2015, с. 89–96
- 4. Zuykov I.V., Resonance acoustical profiling system and methods of using same / US Patent № 6199016 B1, March 6, 2001

References

- 1. Arslanova H.A., Golubchina M.N. and others. Geological dictionary: in 2 volumes under red.K.N. Paffengoltsa. 2 nd ed., Rev. / M .: Nedra, 1978, Volume 1, p. 402
- 2. Zuikov I.V., Bedinov V.V., Application of the Resonance-Acoustic Profiling method for engineering and geological surveys / Engineering Survey 2011 No. 11- p. 52 58
- Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Detection of underground voids in microseisms: physical modeling / INGG SB RAS, Novosibirsk, Seismic exploration technologies, No. 4, 2015, p. 89-96
- 4. Zuykov I.V., Resonance acoustical profiling system and methods of using same / US Patent № 6199016 B1, March 6, 2001

Контактная информация / Contact Information

Зуйков Игорь Владимирович / Zuykov, Igor Vladimirovich Phone: +7 (906) 505 7266 E-mail: <u>rapmethod@yandex.ru</u>