

## ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ФОСФАТОВ СИДИ ШЕННАН (Марокко) ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Саад Баккали

*Earth Sciences Department, Faculty of Sciences and Techniques, Tangier, Morocco*

Одним из эффективных способов усиления контуров изображений является метод оттенения. Зная азимут и высоту источника освещения, с помощью этого метода можно рассчитать отражательную способность поверхности, содержащей интерпретируемые данные. Этот метод обычно используется при обработке данных электроразведки и был применен для уточнения положения участков пустой породы, так называемых нарушений, затрудняющих добычу фосфатов в гигантском бассейне Улад Абдун. Удельное сопротивление на этих участках превышает 200 Ом·м и существенно выше сопротивления фосфатоносных пород (80—150 Ом·м). Электроразведка была проведена на площади 50 га с помощью установки Шлюмберже. Анализ геоэлектрических карт нарушений, полученных с использованием метода оттенения, успешно применен для построения геологических моделей. Опробован новый метод определения размеров аномальных зон нарушений в полевых условиях. В результате удалось уточнить оценки запасов фосфатного сырья.

*Геофизические исследования, удельное сопротивление, фосфаты, аномалия, оттенение, Марокко.*

### REVEALING PRODUCTIVE DEPOSITS AT THE SIDI CHENNANE PHOSPHATE DEPOSIT (Morocco) FROM ELECTRICAL-PROSPECTING DATA

Saad Bakkali

Sunshading is a powerful tool for the enhancement of edges in images. Given the azimuth and elevation of a source illumination, it calculates the reflectance from a surface which is composed of the data to be interpreted. It is a standard tool used in the interpretation of geophysical potential field data. In the great Oulad Abdoun phosphate basin, inclusions of sterile hardpan, so-called “disturbances”, are hard to detect and interfere with phosphate extraction. Their resistivity is above 200 Ohm-m as against 80 to 150 Ohm-m for the phosphate-rich mineral. A Schlumberger resistivity survey over an area of 50 hectares was carried out. Models of the geology were successfully obtained from the analysis of the sunshaded maps of disturbances. A new field procedure was tested to deal with the extension edges of anomalous zones of phosphate deposit disturbances. Phosphate reserves were improved and better constrained.

*Geophysical surveys, resistivity, phosphate, feature, sunshading, Morocco*

### ВВЕДЕНИЕ

Марокко является крупнейшим производителем фосфатов. Годовая добыча фосфатного сырья достигает 19 млн т, а запасы превышают 35 млрд м<sup>3</sup>, что составляет свыше 75 % мировых запасов. При разработке богатых залежей фосфатов в бассейне Улад Абдун в провинции Хурибга (рис. 1), в 120 км южнее г. Касабланка, успешно используются методы электроразведки. В частности, электроразведка проводилась на территории месторождения Сиди Шеннан в пределах бассейна Улад Абдун, занимающего площадь более 800 тыс. га. Месторождение Сиди Шеннан является осадочным и включает несколько отдельных фосфатоносных пластов, которые граничат с переслаивающимися известковыми и глинистыми породами. Добыча фосфатов на этом месторождении началась после того, как было отработано месторождение Большое Дауи. Однако фосфатоносный разрез на новом месторождении включает множество линз пород, не содержащих фосфаты, — так называемых нару-



ботке богатых залежей фосфатов в бассейне Улад Абдун в провинции Хурибга (рис. 1), в 120 км южнее г. Касабланка, успешно используются методы электроразведки. В частности, электроразведка проводилась на территории месторождения Сиди Шеннан в пределах бассейна Улад Абдун, занимающего площадь более 800 тыс. га. Месторождение Сиди Шеннан является осадочным и включает несколько отдельных фосфатоносных пластов, которые граничат с переслаивающимися известковыми и глинистыми породами. Добыча фосфатов на этом месторождении началась после того, как было отработано месторождение Большое Дауи. Однако фосфатоносный разрез на новом месторождении включает множество линз пород, не содержащих фосфаты, — так называемых нару-

Рис. 1. Положение района исследований.

шений. Карманы таких пород, как правило, обнаруживаются только при бурении. Они представляют серьезную помеху при разработке месторождения и искажают реальную оценку запасов фосфатного сырья.

Прямые методы разведки, такие как скважинный каротаж или геологические методы, не дают удовлетворительных результатов. При этом химические изменения, выявленные на границе фосфатноносных образований с карманами пустой породы, создают геоэлектрические неоднородности. Некоторые дополнительные вариации удельного сопротивления могут возникать под воздействием других факторов, таких как литофациальные переходы, содержание глин и плотность (консистенция) пород. Было установлено, что удельное сопротивление фосфатоносных пород составляет 80—150 Ом·м, а сопротивление линз пустой породы варьирует от 200 до 1000 Ом·м. На площади 50 га была проведена предварительная съемка с целью опробовать, закартировать и уточнить границы аномальных объектов, соответствующих карманам-нарушениям. Предполагалось, что геоэлектрические карты позволят получить трехмерное изображение сигналов. Наблюдения проводились с использованием установки Шлюмберже при величинах разноса 80 и 120 м [Bakkali, Bahi, 2005], что соответствует глубине зондирования 15 и 40 м. Так называемые нарушения расположены случайным образом, и карты кажущегося удельного сопротивления, представляющие собой численные изображения [Bakkali, Bahi, 2005], могут использоваться в качестве своеобразного радара для планирования этапов разработки месторождения. В данной работе использован метод отенения [Ногн, 1982] для усиления контуров изображений, полученных в результате обработки данных электроразведки. Предполагается, что распределение интенсивности отражения от поверхности, содержащей интерпретируемые геоэлектрические данные, в первом приближении соответствует степени нарушения в аномальных зонах (нарушенных фосфатоносных зонах).

#### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Месторождение фосфатов Сиди Шеннан расположено в пределах бассейна Улад Абдун, примерно в 33 км к юго-востоку от г. Хурибга (рис. 2). Его границы проходят по меридиану 372500 (в проекции Ламберта) на западе, по меридиану 22800 (в проекции Ламберта) на юге, по шоссе RP22 на востоке и по обнажениям фундамента фосфатоносного разреза на севере. Климат в районе плато в основном сухой. Осадки выпадают в период с ноября по май, как правило, не более 400 мм. Растительность представлена редкими карликовыми пальмами. Местное население занимается разведением крупного рогатого скота и сезонным земледелием в небольших поселках (дуарах). Грунтовые воды все больше и больше скудеют. Скважины распределены неравномерно в соответствии с расположением водоносного горизонта в туронских известняках на глубине 100 м и более, перекрытых слоем сенонских мергелей. Тот же водоносный горизонт используется в качестве источника воды при разработке залежей фосфатов.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

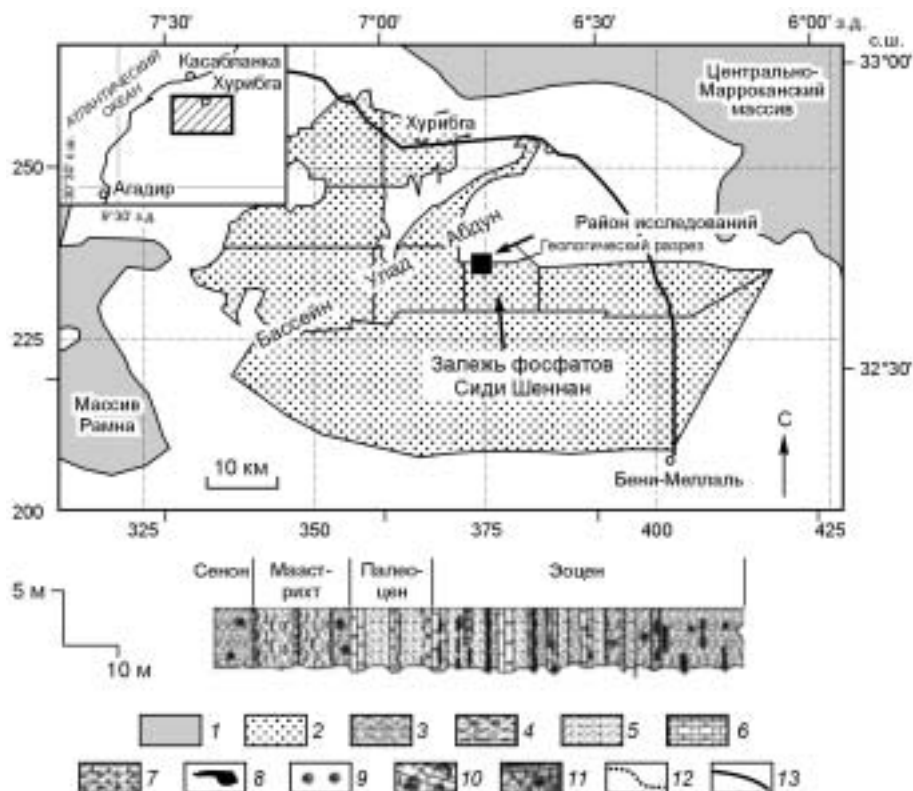
Фосфаты отлагались в течение длительного периода — с маастрихтского (поздний мел, около 80 млн лет) до лютетского (ранний эоцен, 40 млн лет) времени, но осадконакопление шло неравномерно. Некоторые горизонты в разрезе отсутствуют. Бассейн Улад Абдун занимает большую часть фосфатоносного плато, ограниченного с севера обнажениями сеноманских красноцветных осадочных пород на продолжении южного окончания Центрального массива. Западная граница бассейна проходит по хр. Рамна, к югу расположена равнина Бени Амир, а к востоку — Верхний Атлас Бени Меллаль. Геологическое строение района исследований хорошо изучено (рис. 3).

Осадочная толща несогласно залегает на палеозойских сланцах и кварцитах. Положение фундамента достоверно определено, и выявлена довольно значительная мощность осадочного чехла. Маастрихтские и эоценовые образования в верхней части осадочного чехла содержат фосфатоносные пласты мощностью от 30 до 50 м. Более древние отложения (нижняя часть разреза 5 до 28 м) представлены маастрихтскими глинистыми фосфатами. Верхняя часть разреза, (20—30 м) менее однородна и сложена фосфатовыми мергелями и песчаниками с прослоями эоценовых известняков.

Фосфатоносная толща подстилается толщей, включающей слой сенонских мергелей и мергелевых известняков мощностью до 70 м,

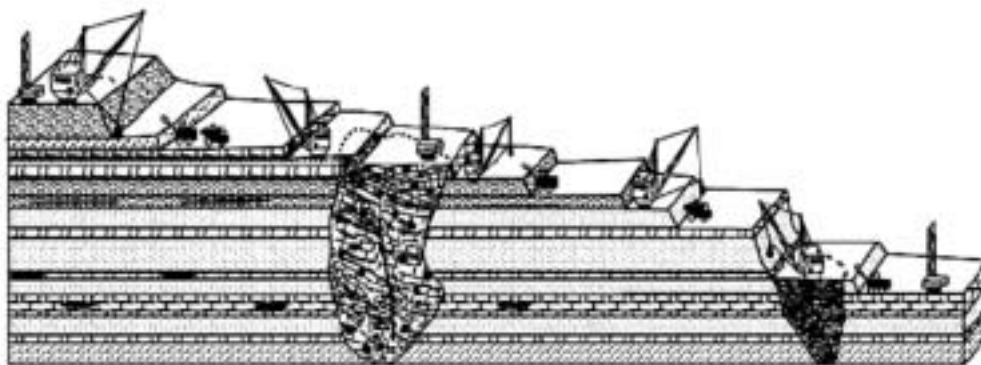


Рис. 2. Основные залежи фосфатов в Марокко.



**Рис. 3. Общая стратиграфическая схема фосфатоносной толщи на месторождении Сиди Шеннан.**

1 — герцинские массивы; 2 — область распространения фосфатоносных пород; 3 — мергели; 4 — фосфатные мергели; 5 — фосфатоносный горизонт; 6 — известняки; 7 — фосфатные известняки; 8 — прерывистый кремнистый горизонт; 9 — кремнистые конкреции; 10 — нарушения, сложенные только кремнистыми известняками; 11 — нарушения, сложенные блоками известняков, мергелями и глинами; 12 — граница распространения нарушений; 13 — дорога.



**Рис. 4. Разработка залежи фосфатов, затрудняемая наличием нарушений.**

слой туронских известняков мощностью от 20 до 60 м, сеноманские переслаивающиеся гипсовые мергели и известняковые мергели и, наконец, досеноманские красноцветные мергели и аргиллиты мощностью от 10 до 60 м.

Нарушения различаются размерами карманов, типом материала, твердостью пород, содержанием глинистой компоненты, типом контакта с фосфатоносными породами. Выявлены две главные разновидности карманов. Карманы первого типа встречаются повсеместно в пределах месторождения и представляют собой хаотическую смесь известняков, мергелей, глин, кремней и слабоизмененных фосфатов с большим количеством кремнистого известняка. Карманы второго типа сильно нарушены, и в них отсутствует какой-либо преобладающий фациальный тип [Kchikash, Hiyane, 1991]. Они образованы нагромождением глыб слабоизмененного фосфатного известняка с крупными конкрециями кремней и мергелей и обломками кремнистых и фосфатных пород. Такие карманы имеют размер от 10 до 150 м и более и встречаются в большом количестве при разработке месторождения (рис. 4).

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Карманы пустой породы расположены как в подстилающей толще, так и в верхних слоях фосфатоносного разреза и создают значительные геоэлектрические неоднородности [Kchikach et al., 2002]. Различия удельного сопротивления между фосфатоносными породами и породами карманов-нарушений были выявлены также в ходе контрольных наблюдений (рис. 5). Таким образом, полевые данные могут быть использованы в качестве предварительной информации для дальнейших геофизических исследований.

Удельное сопротивление — прекрасный параметр для определения типа пород и степени их преобразования. Электроразведка уже давно успешно используется в геофизике и инженерной геологии, и ее методы хорошо отработаны. Метод геоэлектрического картирования нашел множество применений. Его главные преимущества — быстрота установки и простота качественной интерпретации данных. Вариации кажущегося удельного сопротивления отражают соответствующие изменения в распределении истинного удельного сопротивления в разрезе на заданной глубине, а также латеральные неоднородности. Интерпретационные геоэлектрические карты аналогичны картам геологической съемки, но в отличие от них здесь показаны измеренные значения физических параметров, представляющих разрез по глубине. Часто бывает полезно измерить кажущееся удельное сопротивление несколькими установками на одном и том же профиле, чтобы получить несколько разрезов.

Данный район был выбран для исследований как наиболее представительный, в котором геоэлектрические профили должны отражать как нарушенные, так и обогащенные участки [Bakkali, Bahi, 2005]. Разрезы были также откалиброваны с использованием вертикального электрического зондирования [Bakkali, Bouyaloui, 2005]. Геоэлектрические наблюдения позволяют исследовать латеральные приповерхностные неоднородности. Проекция слоев на поверхность дает представление о наличии или отсутствии нарушений и фациальных переходов. Наблюдения проводились с помощью установки Шлюмберже при величинах разноса 80 и 120 м, что соответствует глубинам зондирования 15 и 40 м. Удельное сопротивление измерялось с помощью резистивиметра Syscal 2 производства BRGM Instruments на прямоугольной расстановке 20 × 5 м. Чтобы достичь средней глубины зондирования 15 и 40 м, был пройден 51 профиль с интервалом 20 м для разносов 80 и 120 м соответственно. На каждом профиле располагался 101 приемник на расстоянии 5 м друг от друга, что составило 5151 приемник на каждой установке Шлюмберже.

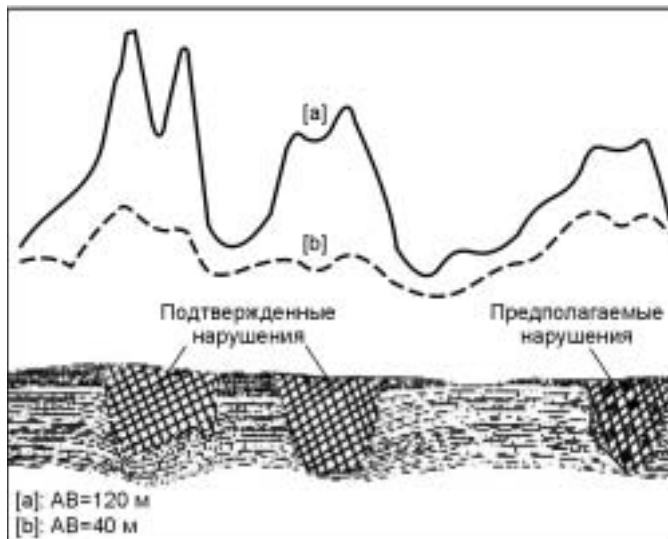


Рис. 5. Геоэлектрический профиль над тремя нарушениями.

## МЕТОД ОТТЕНЕНИЯ

Усиление контуров в изображении геоэлектрических данных позволяет лучше выделить линейные структуры, что облегчает геологическую интерпретацию. Одним из методов усиления контуров, который используется в настоящее время, является метод оттенения. Изображение данных при такой обработке аналогично изображению оттененного рельефа земной поверхности, а оттенение создается освещением от источника на бесконечности, который задается его азимутом и высотой. Для разных типов поверхности существуют различные модели отражения. Как правило, предполагается идеальная поверхность, которая отражает весь падающий на нее свет равномерно во всех направлениях. Это так называемая ламбертовская диффузно светящаяся поверхность, для которой приведенный коэффициент отражения [Pelton, 1987] задается выражением

$$R = \frac{1 + p_0 p + q_0 q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} + \sqrt{1 + p_0^2 + q_0^2}},$$

где  $p_0 = \cos \varphi \operatorname{tg} \theta$  и  $q_0 = \sin \varphi \operatorname{tg} \theta$ ;  $\theta$  — высота источника освещения, измеренная по вертикали, а  $\varphi$  — азимут, измеренный против часовой стрелки от направления на восток. При этом  $p$  и  $q$  — градиенты

значений параметров в направлениях на восток и на север соответственно, которые можно рассчитать в пространственной области по формулам

$$p = \frac{\partial \rho_{app}(x, y)}{\partial x} = \frac{\rho_{i+1, j} - \rho_{i-1, j}}{2\delta x} \quad \text{и} \quad q = \frac{\partial \rho_{app}(x, y)}{\partial y} = \frac{\rho_{i, j+1} - \rho_{i, j-1}}{2\delta y},$$

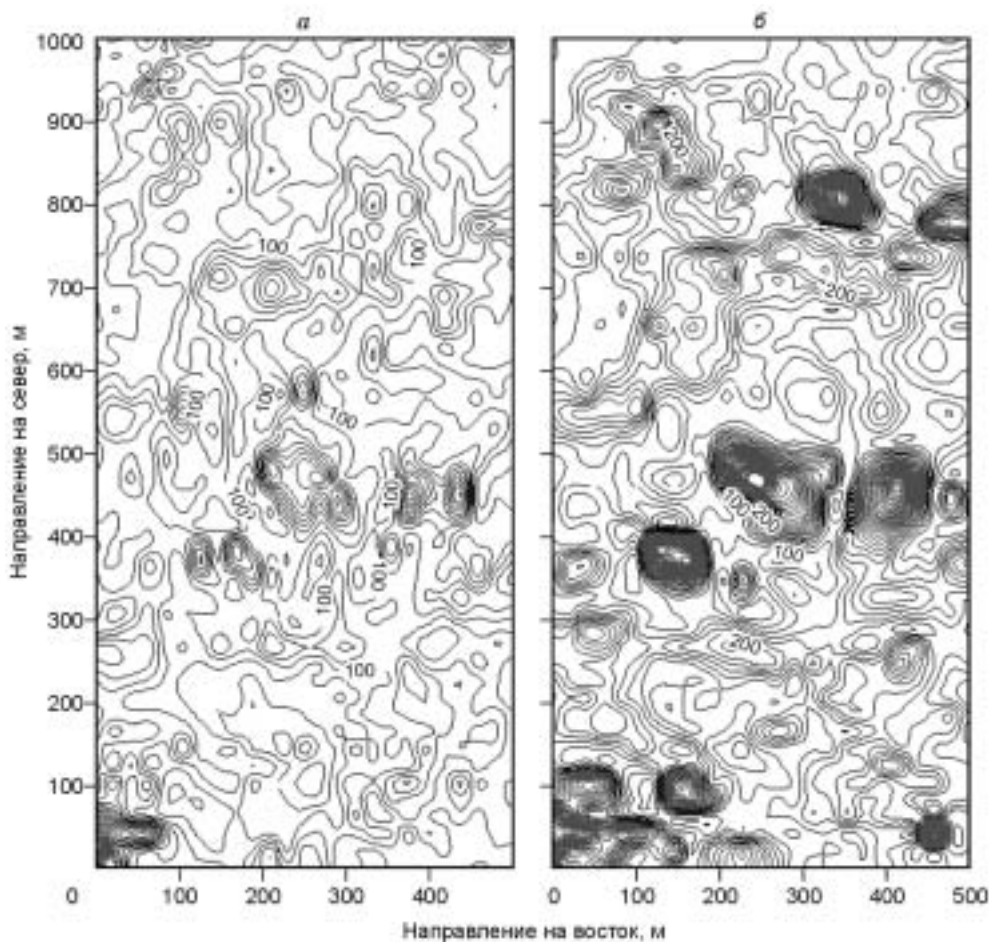
где  $x$  — восточная координата, а  $y$  — северная координата;  $\rho_{i, j}$  — псевдокажущееся удельное сопротивление, определенное в точке  $(i, j)$  сетки с шагом  $\delta x$  и  $\delta y$  соответственно в направлениях  $x$  и  $y$ .

Высота и азимут источника освещения задаются произвольно. Поскольку порядок производной один и тот же для обоих горизонтальных градиентов, ориентация нормали к поверхности, от которой зависит отражательная способность, остается неизменной.

Контурные структур усиливаются, если они расположены под прямым углом к азимуту источника освещения и ослабляются при параллельной ориентировке. Для усиления контуров произвольно расположенных структур заданный азимут должен составлять  $180^\circ$  относительно самого крутого наклона в каждой точке поверхности [Cooper, 2003].

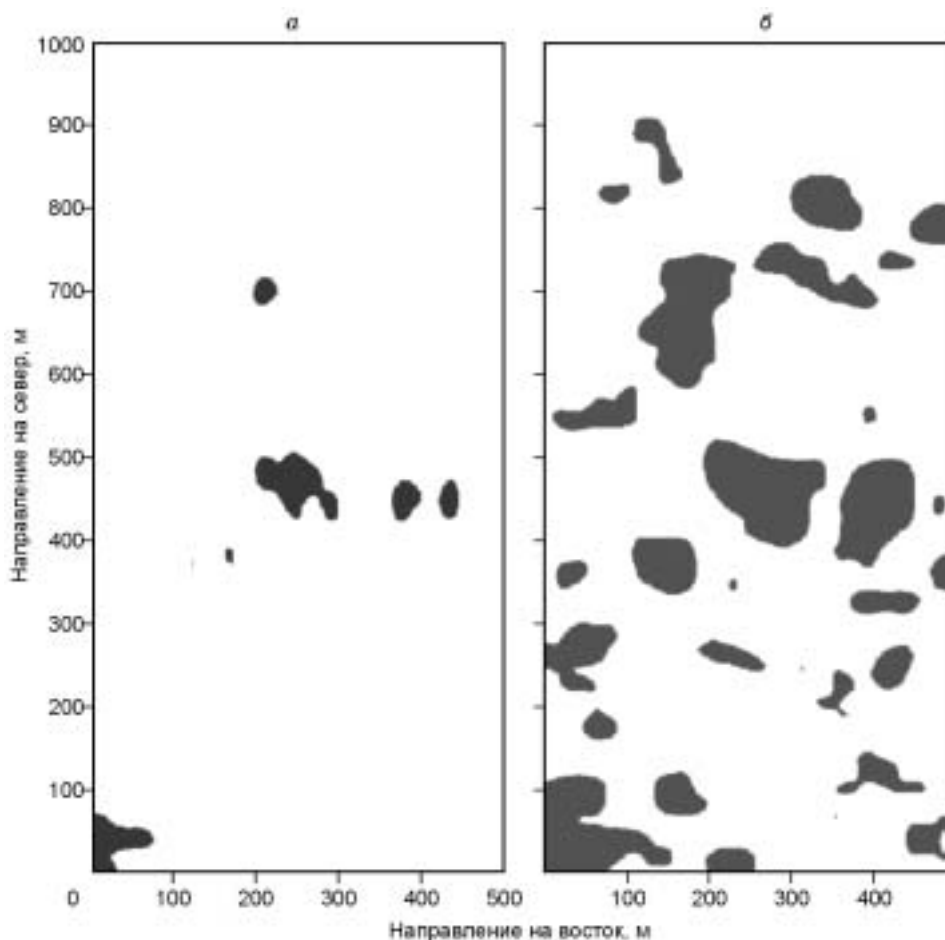
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные распределения кажущегося удельного сопротивления (рис. 6) рассматривались как карты дискретных потенциалов на свободной поверхности, и всякая значительная аномалия кажущегося сопротивления, связанная с наличием возмущения, считалась обусловленной переходом от „нормальной“ к „возмущенной“ области и обратно [Bakkali, 2006]. Иными словами, карты кажущегося удельного сопротивления рассматривались как карты скалярных разностей потенциалов, которые считались гармоническими функциями везде кроме возмущенных участков. Таким образом, предполагалось, что такие



**Рис. 6.** Геоэлектрические карты района исследований, полученные с помощью установки Шлюмберже при величинах разноса (здесь и далее) 80 (а) и 120 м (б).

Шаг изолиний — 20 Ом·м.



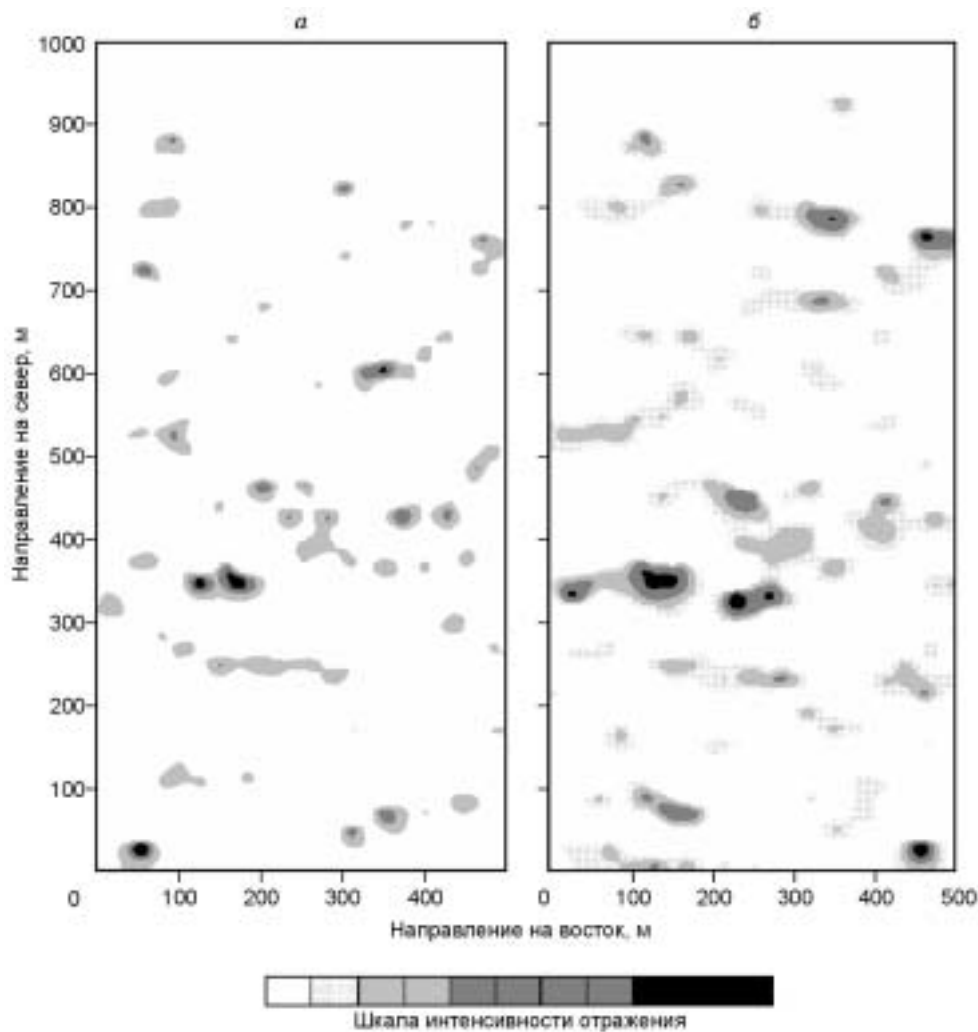
**Рис. 7. Распределение аномалий удельного сопротивления, полученное с помощью установки Шлюмберже.**

карты можно обрабатывать как в пространственной, так и в частотной областях [Cooper, Cowan, 2003]. Геоэлектрические карты, полученные в результате предыдущих исследований и основанные на таких предположениях, позволили получить прямые изображения для интерпретации данных электроразведки. С их помощью удалось выявить аномальные зоны, которые, как оказалось, коррелируют с нарушениями в фосфатносном разрезе [Bakkali, Bahi, 2005; Bakkali, 2006]. В результате были построены карты аномальных областей, соответствующих нарушениям в бассейне Улад Абдун (рис. 7).

Обработка данных проводилась с использованием программы Easy Mapping [Monnereau, 2003]. Метод оттенения по сути представляет собой пространственный фильтр, усиливающий контуры аномальных зон. Для усиления контуров изображений произвольной ориентировки задавался источник освещения с азимутом  $180^\circ$  и нулевой высотой (рис. 8). Как было установлено, нарушения, прослеженные в ходе наземной съемки, распределены случайным образом, что проявилось также на картах, полученных с использованием метода оттенения (см. рис. 8).

Нарушения, выявленные при зондировании до глубин менее 15 м (разнос 80 м), представляются не очень значительными. Нарушения же, соответствующие аномальным зонам месторождения фосфатов, были обнаружены при глубине зондирования от 15 до 40 м. Этот основной вывод получен непосредственно в результате сравнения карт аномальных зон месторождения фосфатов для двух установок Шлюмберже. В данном случае разнос установки определяет размер пространственного фильтра для выявления аномальных зон, соответствующих нарушениям в фосфатносном разрезе.

Карты, полученные с использованием метода оттенения (см. рис. 8), позволяют надежно определить степень нарушения по измерениям на земной поверхности в пределах района исследований. Отражательная способность должна быть максимальной непосредственно над массивами пород с плотностными неоднородностями и является в этом случае показателем величины контрастов плотности между породами нарушения и фосфатносными породами. Повышенное отношение коэффициентов отражения свидетельствует о высокой степени нарушения. Использование метода оттенения в нашем случае позволило усилить



**Рис. 8.** Карты аномальных зон, соответствующих нарушениям на месторождении фосфатов в бассейне Улад Абдун, полученные с использованием метода оттенения при ориентировке источника освещения под углом  $180^\circ$ .

контуры аномальных областей и определить степень нарушения по отражательной способности. По оценке исследователей, степень нарушения аномальных зон может быть низкой, умеренно низкой, умеренно высокой, высокой и очень высокой. Предполагается установить соответствие этих свойств аномальным зонам, выявленным в ходе обработки данных с использованием усиления контуров методом оттенения.

#### ВЫВОДЫ

Было установлено, что обработка данных с использованием оттенения позволяет уточнить распределение аномальных зон на поверхности. Описан метод анализа, представляющий собой пространственный фильтр для усиления контуров аномальных зон при решении конкретной задачи, связанной с добычей фосфатов. Получены удовлетворительные результаты. Описанный метод может успешно применяться как дополнительный способ получения информации о нарушениях, необходимой для принятия решений в полевых условиях. Оттененные изображения нарушений, полученные при ориентировке источника освещения под углом  $180^\circ$ , оказались полезны для уточнения оценки запасов фосфатов на месторождении в бассейне Улад Абдун. Метод оттенения, основанный на соответствии величины отражательной способности и степени нарушения, представляется перспективным средством оптимизации запасов в целях добычи полезных ископаемых.

## ЛИТЕРАТУРА

**Bakkali S., Bahi L.** Cartographie des „dérangements“ de séries phosphatées par mesures de résistivités électriques // J. Sci. Pour l'Ingénieur, 2006, v. 6, p. 1—10.

**Bakkali S., Bouyalaoui J.** Essai d'optimisation de la capacité de retenue d'eau d'un lac par caractérisation géophysique du recouvrement argileux // African J. Sci. & Technol., 2005, v. 6 (2), p. 12—22.

**Bakkali S.** A resistivity survey of phosphate deposits containing hardpan pockets in Oulad Abdoun, Morocco // Geofisica Internacional, 2006, v. 45 (1), p. 73—82.

**Cooper G.R.J.** Feature detection using sunshading // Computer & Geosciences, 2003, v. 29, p. 941—948.

**Cooper G., Cowan D.** The application of fractional calculus to potential field data // Exploration Geophysics, 2003, v. 34, p. 51—56.

**Horn B.K.P.** Hill shading and the reflectance map // Geoprocessing, 1982, v. 2, p. 65—146.

**Kchikach A., Hiyane M.** Apport de la géophysique a la détermination des dérangements a Sidi Chennane Nord. Publications Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat, Maroc, 1991.

**Kchikach A., Jaffal M., Aifa T., Bahi L.** Cartographie de corps stériles sous couverture quaternaire par méthode de résistivités électriques dans le gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc) // Comptes Rendus. Geosciences, 2002, v. 334, p. 379—386.

**Pelton C.** A computer program for hill-shading digital topographic data sets // Computer & Geosciences, 1987, v. 13 (5), p. 545—550.

**Monnereau O.** About EasyMapping software version 3.0, Manuel d'utilisation, Copyright 2001—2003 Olivier Monnereau., 2003.

*Рекомендована к печати 30 января 2007 г.  
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 20 сентября 2005 г.,  
после доработки — 16 декабря 2006 г.*