

АДАПТИВНЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ В ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Алёшин Ю.Г.
ИГиОН НАН КР

Типичной задачей геофизической структуроскопии горных массивов является распознавание каждого из объектов (литологических разностей, слоёв, структурных нарушений), наблюдаемых одновременно при каждом измерении. Распознавание групп объектов, но не каждого из них поодиночке позволяет использовать новые признаки: расстояние между объектами, соотношение их геометрических характеристик, число слоёв, их взаимоположение (стратиграфия). При этом дополнительно может быть привлечена геологическая информация, результаты бурения опорных скважин на исследуемом участке горного массива. Даже если пренебречь этой информацией и ограничиться тем же множеством признаков, что и при распознавании одиночных объектов, можно использовать ряд решающих процедур значительно более эффективных, чем традиционные алгоритмы распознавания отдельно взятых объектов. К числу таковых можно отнести процедуру циклического пересчёта адаптивных оценок.

Одно и то же множество измеренных значений геофизических признаков $\{\bar{X}_j\}$ в циклических процедурах может быть использовано для уточнения состава группы объектов распознавания. Если статистики оценок $g(\bar{x})$ зависят от априорных вероятностей классов $P_a(A_i)$, то замена последних в каждом новом $q+1$ цикле адаптации величина-

ми более близкими к вероятности $P(A_i)$, чем $P_a(A_i)$, позволяет рассчитывать на последовательное уточнение адаптивных оценок.

Рассмотрим на конкретном примере две процедуры циклического пересчёта адаптивных оценок: (1) – формальная и (2) – "содержательная" с использованием общегеологических закономерностей.

По результатам геоэлектротомографии на оползневом участке в г. Майлуу-Суу геоэлектрический разрез в целом вдоль одного из разведочных профилей был получен в следующем виде (рис.1). Общегеологическими работами установлено, что в разрезе горного массива присутствуют следующие литологические разности (сверху вниз): 1) суглинки лёссовидные, макропористые твёрдые и полутвёрдые, (2) суглинки тугопластичные, с глубиной увлажнённые, (3) песчаники верхнемеловые рыхлые, на глинисто-известковом цементе. Распределение вероятностей этих геолого-литологических разностей по глубине массива ранее было получено в виде, указанном на рис. 2. На этапе обучения распределение величины УЭС ρ горных пород для представленных в разрезе структурных классов было аппроксимировано γ -распределением как это показано на рис. 3.



Рис. 1. Геоэлектрический разрез (усреднённый) вдоль разведочного профиля на оползневом склоне Кульмен в г. Майлуу-Суу

Формальная процедура. Находим средние вероятности (априорные) предъявления к распознаванию отдельных структурных классов при глубине исследования массива H_m

$$\bar{P}_{ia} = \frac{1}{H} \int_0^{H_m} P_{ia}(H) dH \quad (1)$$

В рассматриваемом примере для $H_m = 40$ м имеем: $\bar{P}_{1a} = 0,072254265$; $\bar{P}_{2a} = 0,107415495$; $\bar{P}_{3a} = 0,82033024$. Условие минимума ошибок распознавания характеризуется следующей системой уравнений:

$$\bar{P}_{1a} f(\rho^*/A_1) = \sum_{i \neq 1}^{I=2} P_{ia} f(\rho^*/A_i); \quad \bar{P}_{3a} f(\rho^{**}/A_3) = \sum_{i \neq 3}^{I=2} P_{ia} f(\rho^{**}/A_i) \quad (2)$$

где $f(\cdot)$ – условная плотность вероятности распределения величины УЭС ρ грунтов i -го класса.

В результате решения находим граничные значения ρ^* и ρ^{**} для разделения i -го и j -го класса. В данном случае имеем $\rho^* = 155$ Ом·м; $\rho^{**} = 11,5$ Ом·м. При таких границах следует принимать в геологическом разрезе: при $\rho \leq \rho^*$ – суглинки влажные и глины (класс A_2); при $\rho > \rho^*$ – почвенно-растительный слой и суглинки твёрдые и полутвёрдые (класс A_1); при $\rho^{**} < \rho < \rho^*$ – песчаники нижнемеловые (класс A_3).

После анализа имеющихся данных получаем оценки апостериорных вероятностей первого цикла: $\bar{P}_{11} = 0,025$; $\bar{P}_{21} = 0,2$; $\bar{P}_{31} = 0,775$. При этом условные вероятности правильных β_{i1} и ошибочных $|\lambda_{i1}|$ решений будут определяться следующей матрицей, где диагональные элементы определяют условные вероятности правильных решений:

$$|\Lambda_0| = \begin{vmatrix} 0,215 & 3,074 \cdot 10^{-5} & 0,785 \\ 5,495 \cdot 10^{-3} & 0,133 & 0,861 \\ 8,090 \cdot 10^{-3} & 7,860 \cdot 10^{-3} & 0,984 \end{vmatrix} \quad (3)$$

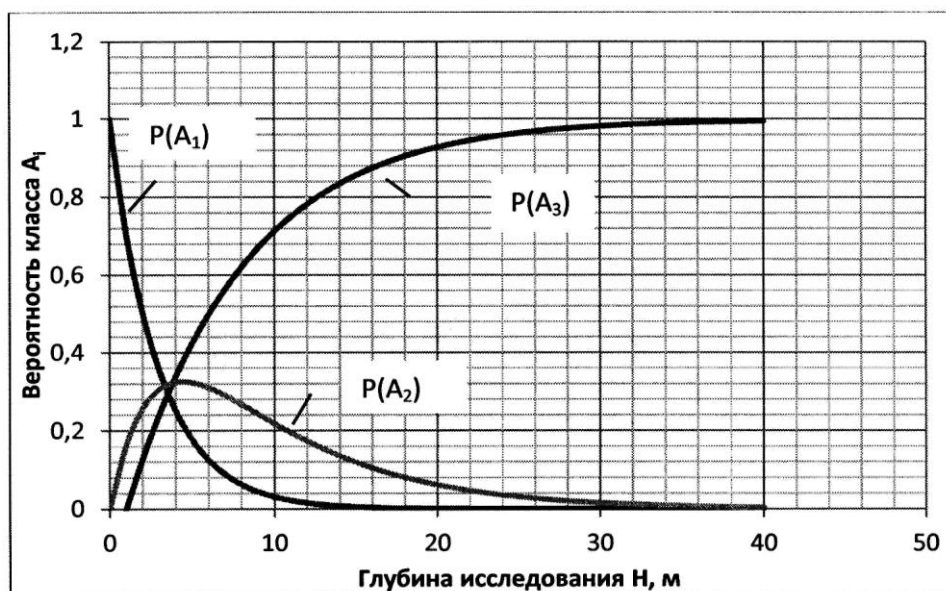


Рис. 2. Вероятности распределения классов горных пород по глубине горного массива на оползневом склоне Кульмен в г. Майлуу-Суу

Сопоставляя исходные значения априорных вероятностей классов P_{ia} и апостериорные после первого цикла P_{i1} , можно заметить не большое их различие, однако высокие уровни ошибок при распознавании класса A_3 ($\lambda_{13} = 0,78470$; $\lambda_{23} = 0,8610242$) не позволяют далее продолжить циклическую процедуру. Следует остановиться на полученных значениях P_{i1} и представить геологический разрез в следующем виде (показано на рис. 4а): на глубине 0-1 м – сухой суглинок, почвенно-растительный слой; на глубине от 1 до 7 м – навалы песчаника нижнемелового, сверху до глубины 4 м сухие, ниже – влажные; от 8 до 15 м – суглинок переувлажнённый, водонасыщенный (на глубине 13–15 м), возможно с глинистым прослоем на глубине 15 м; более 16 м – песчаник влажный на глубине 16–17 м, далее с глубиной – менее влажный.

Формальные процедуры, исходя из модели хаотического беспорядка (модели Изинга), позволяют структурировать горный массив хотя бы по принципу выделения в его пространстве более или менее связанных областей залегания отдельных структурных классов грунтов.

Содержательная процедура. Основанием этой процедуры является пошаговый анализ геофизических данных по глубине горного массива. Сформулированные на предыдущем этапе (формальная процедура) кластеры следует рассмотреть с учётом априорной информации о вероятностном распределении классов горных пород по глубине массива (рис. 2). Выделены три интервала глубин с относительно однородным составом: глубины от 0 до 7 м, где идентифицированы на первом этапе в основном песчаники верхнемеловые (в виде навала плит и глыб); глубины от 7 до 15 м, где идентифицированы суглинки различной влажности; глубины свыше 16 м, где идентифицированы песчаники в коренном залегании.

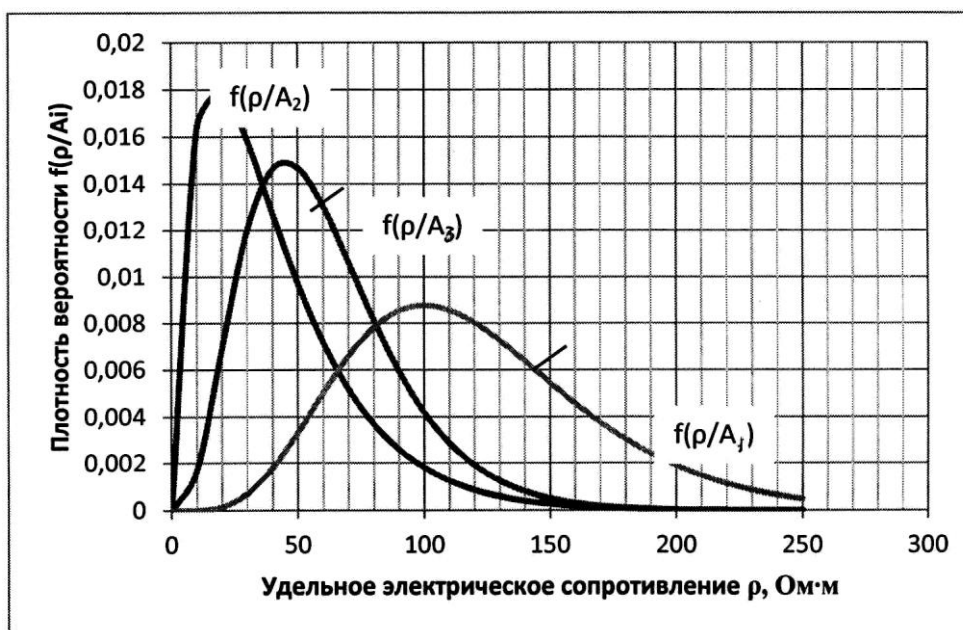


Рис. 3. Распределение плотностей вероятности величины УЭС грунтов различных классов (суглинки и песчаники Майлуу-Суу)

Средние априорные вероятности появления отдельных классов горных пород на интервале глубин от 0 до 7 м согласно рис. 2, и формулы (1) составляют: $\overline{P}_{1a}^{(1)} = 0,37624$; $\overline{P}_{2a}^{(1)} = 0,2638256$; $\overline{P}_{3a}^{(1)} = 0,359933$. Решая уравнения (2) для этих условий, находим новые граничные значения $\rho_{ij}^{(1)*}$ для раздела i -го и j -го классов $i, j \in \overline{1,3}$ $\rho^{(1)*} = 29$ Ом·м;

$\rho^{(1)**} = 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Эти граничные значения определяют следующие решения при геологической интерпретации геофизических данных: в интервале $\rho < 29 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ суглинки лёссовидные (класс A_2); в интервале $29 < \rho < 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – песчаники нижнемеловые в коренном залегании (класс A_3); в интервале $\rho > 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – почвенно-растительный слой и сухие твёрдые суглинки (класс A_1). При этом получаем следующие оценки апостериорных вероятностей после второго цикла адаптации на интервале глубин 0–7 м: $\bar{P}_{1a}^{(1)} = 0,571$; $\bar{P}_{22}^{(1)} = 0,42$; $\bar{P}_{32}^{(1)} = 0$. Таким образом, геологическое представление о разведываемом участке горного массива на верхних горизонтах радикально изменилось: теперь он представляется состоящим из двух разновидностей суглинка – сухих рыхлых в верхней части до глубины 4 м, и увлажнённых, полутвёрдых на глубинах 4–7 м.

После решения первого из уравнений (2), но уже для двух классов A_1 и A_2 находим граничное значение $\rho^* \approx 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, при этом достоверность распознавания характеризуется матрицей правильных и ошибочных решений

$$|\Lambda_1| = \begin{vmatrix} 0,92 & 0,08 \\ 0,18 & 0,82 \end{vmatrix} \quad (4)$$

Ввиду малых величин ошибочных решений можно провести коррекцию смещений в оценке $\bar{P}_{i2}^{(0)}$ согласно /1/ и окончательно получить распределение по вероятности классов грунтов в первом слое

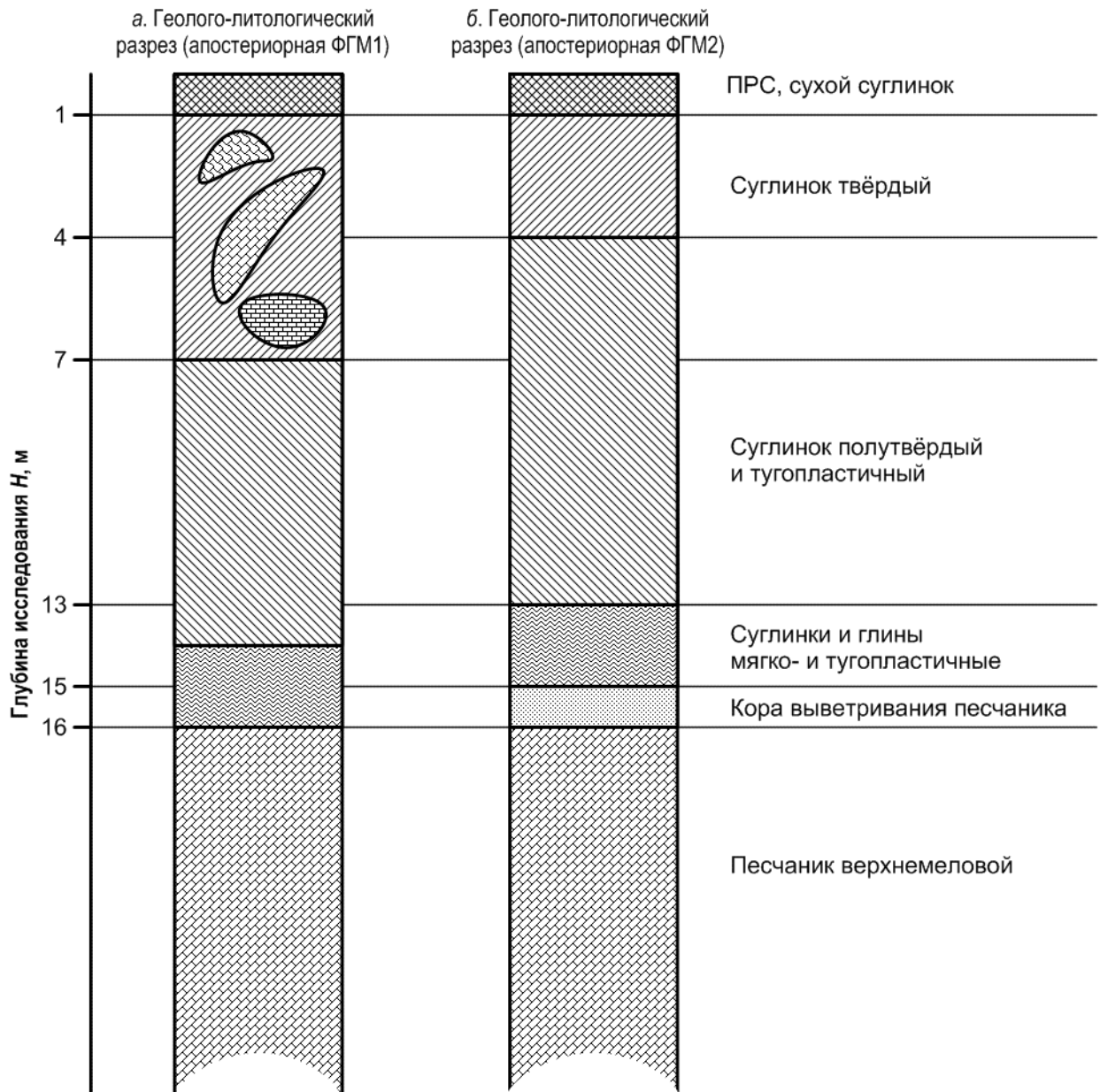


Рис. 4. Трансформация геолого-литологического разреза участка проведения геофизических работ в Майлуу-Суу с использованном адаптивного циклического алгоритма распознавания.

$$P_{12}^{(0)} = \frac{\bar{P}_{12}^{(0)} - \lambda_2}{\beta_1 - \lambda_2} = 0,529; \quad P_{22}^{(1)} = \frac{\bar{P}_{22}^{(1)} - \lambda_1}{\beta_2 - \lambda_1} = 0,471; \quad P_{32}^{(1)} = 0 \quad (5)$$

При этом достоверность распознавания составит 85% для класса A_1 и 90% для класса A_2 .

Далее рассматриваем интервал глубин от 8 до 16 м. Прделав уже известные вычислительные процедуры, будем иметь следующие

граничные значения УЭС: $\rho^{(2)*} = 16 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\rho^{(2)**} = 180 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При этом следует относить горные породы при $\rho < \rho^{(2)*}$ к классу A_2 – суглинки лёссовидные влажные и обводнённые; $\rho^{(2)*} \leq \rho \leq \rho^{(2)**}$ – к классу A_3 – коренные песчаники различной степени обводнённости и, наконец, $\rho > \rho^{(2)**}$ – к классу A_1 – поверхностные суглинки рыхлые, сухие.

После анализа исходных данных были получены следующие величины апостериорных вероятностей классов горных пород $\overline{P}_{13}^{(2)} = 0$; $\overline{P}_{23}^{(2)} = 0,8888$; $\overline{P}_{33}^{(2)} = 0,1111$, т.е. в геологическом разрезе на интервале глубин от 8 до 16 м отсутствуют сухие суглинки; разрез представлен преимущественно плотными суглинками, обводнёнными на глубине 14–15 м на контакте с песчаником. Матрица правильных и ошибочных решений для выделенных двух классов A_2 и A_3 этого интервала выглядит следующим образом:

$$|\Lambda_2| = \begin{vmatrix} 0,24 & 0,76 \\ 0,05 & 0,95 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Достоверность результатов идентификации класса A_2 составляет 97,5%, класса A_3 – 13,5% (на глубине 16 м). При этом обращает на себя внимание весьма малая величина условной вероятности правильных решений β_2 для класса A_2 .

Наконец, в интервале больших глубин (свыше 16 м) при априорных вероятностях структурных классов: $P_{1a}^{(3)} = 0,00475$, $P_{2a}^{(3)} = 0,0310788$, $P_{3a}^{(3)} = 0,9684466$, будем иметь следующие граничные значения УЭС горных пород для разделения $\rho^{(3)*} = 7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho^{(3)**} > 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При таких границах раздела структурных классов в разрезе горного массива на изучаемом интервале глубин идентифицирован только один класс A_2 – песчаники от влажных до нормальной влажности по мере увеличения глубин залегания, т.е. $\overline{P}_{12}^{(3)} = 0$; $\overline{P}_{22}^{(3)} = 0$; $\overline{P}_{32}^{(3)} = 1$.

Окончательно представляем геологический разрез в виде, показанном на рис. 4б. В результате использования многоэтапной адап-

тивной процедуры распознавания и циклической корректировки решений произошло структурирование модели массива к её классическому виду, характерному для исследуемой территории и подтверждённой многочисленными исследованиями, проведёнными нами здесь с применением буровых работ. Этот пример ясно показал, что при глубоком и всестороннем использовании априорной модели горного массива и в существенной мере под её влиянием выстраивается (структурируется) апостериорная модель как результат инженерно-геологической интерпретации геофизических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селекция и распознавание на основе локационной информации / А.Л. Горелик, Ю.Л. Барабаш и др. Под ред. А.Л. Горелика. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.