

5. Учебные материалы “Геофизические исследования при освоении и эксплуатации скважин нефтяных месторождений”. Кафедра геофизики БашГУ, 2010.
6. Williamson H. S. Accuracy Prediction Measurement while Drilling. SPE 67616 Drill. & Completion. December 2000.
7. Wolff C. J. M., de Wardt J. P. Borehole Position Uncertainty – Analysis of Measuring Methods and Derivation of Systematic Error Model. JPT, December 1981. P. 2339.

*Рецензенты канд. техн. наук Г. А. Павленко,  
канд. техн. наук Н. Г. Козыряцкий*

УДК 550.85

*М. Ю. Зубков, А. А. Ишков  
ООО “ЗапСибГЦ”*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОФИЛОГРАФА ПРИ ИЗУЧЕНИИ МИКРОСЛОИСТЫХ РАЗРЕЗОВ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

Рассмотрены устройство, возможности и преимущества метода профилографии по сравнению с другими, используемыми при изучении тонкослоистых разрезов осадочных пород. Показана возможность использования профилографа для оценки линейных запасов углеводородов.

*Ключевые слова:* керн, профилограф, шероховатость, тонкослоистый разрез, гранулометрический состав, литологические типы пород, пористость, проницаемость, водоудерживающая способность.

### **Введение**

При изучении тонкослоистых разрезов, представленных частым чередованием проницаемых нефтенасыщенных (песчано-алевритовых) и очень слабо проницаемых водонасыщенных (глинисто-алевритовых) прослоев, возникает проблема определения их объемного содержания в изучаемом разрезе, без чего невозможно корректно выполнить подсчет запасов в этом типе осадков.

Интерпретация данных ГИС, используемых для оценки емкостных свойств таких типов разрезов, также представляет собой довольно сложную задачу из-за невозможности дифференциации тонкослоистых разрезов существующими геофизическими методами. Поэтому необходима литолого-петрофизическая база данных, позволяющая увязать литологический состав пород и их коллекторские свойства, с одной стороны, и результаты ГИС, с другой.

Осуществить выделение отдельных прослойков в образцах полноразмерного керна, которые часто имеют толщину от десятков мкм до первых мм вручную крайне сложно, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, из-за огромной трудоемкости такой работы и, во-вторых, из-за значительного вклада субъективного фактора – на одних и тех же образцах керна различными операторами будут выделены различные по числу и мощности прослои глинистых и песчано-алевритовых литологических типов пород (далее по тексту литотипов).

С целью автоматизации процесса дифференциации разрезов на различные литотипы предлагаются различные методы, наибольшее распространение среди которых получили методы, основанные на автоматической обработке фотографий керна (в том числе в ультрафиолетовом свете) с помощью специально разработанных компьютерных программ (С. А. Чухланцев, А. С. Сулима, 2003; В. В. Пошибаев, Е. С. Коновальцева, О. В. Омельченко, А. С. Кузнецов, 2012; А. Р. Акманаев, 2012; В. А. Ефимов, 2013; А. Е. Алтунин, 2013; А. В. Акиньшин, В. А. Ефимов, 2014). Общим в этом методе является определение площадной доли глинистых прослоев и включений глин по фотографиям полноразмерного керна, основанное на дифференциации фотографий по яркости с последующим разделением глинистых и песчано-алевритовых литотипов путем моделирования распределения яркости прослоев различного литологического состава. Следует обратить внимание на то, что этим методом выделяются всего два литотипа, а именно глинистые (неколлекторы) и песчано-алевритовые (коллекторы).

Другой способ для решения задачи дифференциации тонкослоистого разреза на литотипы предложен В. В. Семеновым в 2010 г. и получил дальнейшее развитие в работе М. Ю. Зубкова и В. П. Косякова в 2012 г. Эти специалисты предложили для изучения тонкослоистых разрезов метод микропрофилирования, основанный на использовании профилографа, позволяющего с высокой точностью измерять

перепады высот на специально подготовленной поверхности полноразмерного керна и выделять прослой толщиной от первых мкм.

Цель настоящей публикации – продемонстрировать возможности этого метода при изучении тонкослоистых разрезов, а также некоторые его преимущества перед первым способом, основанным на интерпретации фотоснимков полноразмерного керна.

### **Основы метода микропрофилирования и его технические возможности**

В методе микропрофилирования используется профилограф, который представляет собой аналитический прибор, позволяющий с высокой точностью измерять степень шероховатости специально подготовленной поверхности образцов горных пород. Прибор дает возможность проводить определения гранулометрического состава осадочных горных пород и наличия или отсутствия в них трещин и каверн, а также определять их геометрические размеры.

Профилограф имеет следующие технические характеристики:

- максимальная длина исследуемого образца, мм ..... 500
- скорость перемещения исследуемого образца относительно датчика профилографа, регулируемого бесступенчато, мм/мин ..... 5–50
- угол поворота рабочего стола, град ..... 90
- диапазон измеряемой шероховатости, мкм ..... 1–1000

Устройство профилографа представлено на рис. 1. Он состоит из лотка 3, на который помещается исследуемый образец полноразмерного керна 1; датчика шероховатости 2 (оборудованного специальной алмазной иглой), который преобразует неровности поверхности образца в электрические сигналы; измерителя линейных перемещений 4; шагового двигателя 5, перемещающего лоток с образцом; блока управления 6 и персонального компьютера.

На компьютере запускается специальная программа Spike для обработки данных, которые получены с помощью профилографа. Эта программа выполняет две основные функции:

- 1) чтение оцифрованных данных, полученных с помощью профилографа с последующим сохранением массива полученных данных на ПК и возможностью их просмотра в графическом представлении;



Рис. 1. Устройство профилографа:

1 – образец керна; 2 – датчик шероховатости; 3 – лоток; 4 – измеритель линейного перемещения; 5 – шаговый двигатель; 6 – блок управления

2) анализ данных профилографа для определения характеристик керна: литологии, мощности прослоев, их количества и гранулометрических параметров.

С целью перевода записи профилографа, осуществляющейся в единицах напряжения ( $\mu\text{V}$ ) в единицы размера ( $\mu\text{м}$ ), используется эталон шероховатости Elcometer 125 (GritG201), в котором присутствуют четыре сегмента с различной зернистостью (рис. 2). Для этого строится зависимость между амплитудой колебаний, полученных на профилографе в пределах каждого из четырех сегментов, от размеров зерен, присутствующих на этих сегментах (рис. 3). Причем средний размер частиц, расположенных в пределах каждого из упомянутых выше сегментов, нанесенных на график (рис. 3), измерялся изготовителями этого эталона двумя независимыми методами: методом иглы (ISO 8503/4) и с помощью микроскопа (ISO 8503/3). Усредненные результаты определения шероховатости этими методами нанесены на упомянутый выше рисунок.

В основе обработки профилограмм лежит “одномерная” модификация принципа Кавальери, известная как метод Делесса и Розиваля. Этот метод был разработан ими для определения относительных количеств различных минералов в петрографических шлифах. Этот же метод используется для определения гранулометрического состава обломочных зерен, слагающих осадочные породы, в петрографических шлифах.

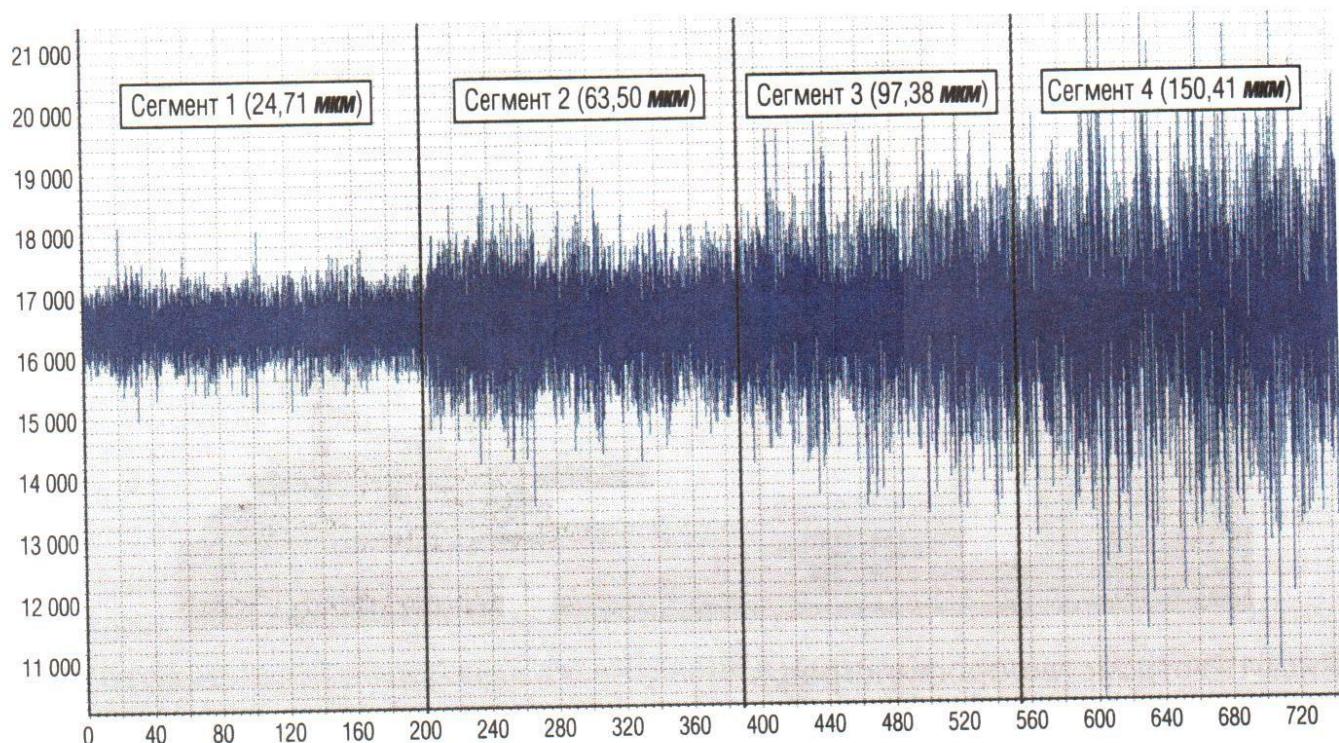


Рис. 2. Спектры, полученные на профилографе с эталона шероховатости Elcometer 125 (Grit G201), имеющего четыре сегмента с различной шероховатостью

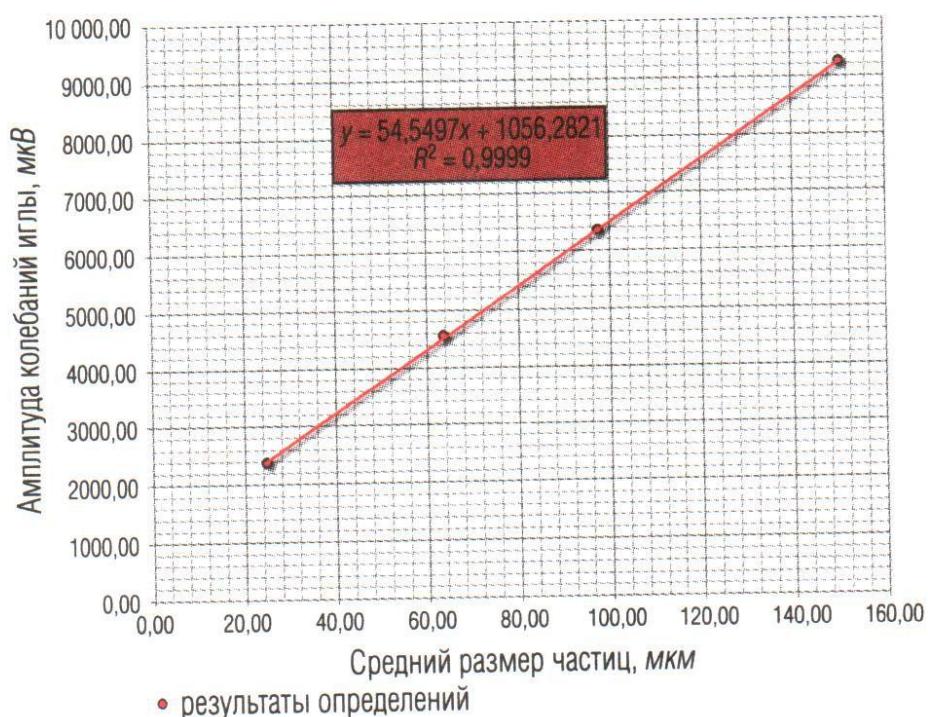


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний иглы профилографа от среднего размера частиц (шероховатости) по усредненным данным, полученным методом иглы (ISO 8503/4) и с помощью микроскопа (ISO 8503/3)

Суть описываемого метода заключается в проведении одной или нескольких линий на шлифе и измерении по ним поперечников каждого минерала (при определении минерального состава породы) или размеров обломочных зерен (при определении гранулометрического состава осадочной породы). Сумма поперечников каждого минерала или обломочных зерен указывает на его (минерала) или их (зерен определенного размера) относительное содержание в петрографическом шлифе и, следовательно, в самой исследуемой породе. Если длина шлифа в 100 раз больше диаметра отдельных зерен, то точность определения минерального или гранулометрического состава достигает 1%.

Данные о гранулометрическом составе, получаемые с помощью профилографа, гораздо более точные, чем при петрографических исследованиях в шлифах, так как длина исследуемого интервала, обычно равная 1 м, более чем в  $1 \cdot 10^5$  раз превышает размеры частиц, слагающих образцы.

В методе микропрофилирования измерение размеров обломочных зерен производится автоматически с помощью профилографа, что значительно упрощает и ускоряет процесс определения гранулометрического состава исследуемых пород.

## Результаты исследований

С целью повышения надежности и достоверности результатов, получаемых с помощью профилографа, кроме его настройки с помощью эталона шероховатости (рис. 3), была подготовлена специальная коллекция образцов, на которой после определения содержания в них четырех литотипов (глины, мелкозернистые алевролиты, крупнозернистые алевролиты и мелкозернистые песчаники) с помощью профилографа, для определения их гранулометрического состава использовались также прозрачные петрографические шлифы (изготовленные из этих же образцов) и результаты обычного гранулометрического анализа (механо-гидравлический метод). Проведенные исследования позволили определить интервалы, в которых изменяются амплитуды колебаний иглы при микропрофилировании каждого из четырех выделенных литотипов и рассчитать средний размер зерен, входящих в состав этих литотипов (табл.).

Таблица

Границчные значения амплитуды колебания иглы  
для каждого из выделенных литотипов

Литотип	Глина			Мелкозернистый алевролит			Крупнозернистый алевролит			Мелкозернистый песчаник		
Значение амплитуды, мкВ	Мин.	15 420	Размах амплитуды	Мин.	14 906	Размах амплитуды	Мин.	12 795	Размах амплитуды	Мин.	11 500	Размах амплитуды
	Макс.	17 476	2056	Макс.	18 361	3455	Макс.	19 403	6608	Макс.	20 817	9317
Средний размер зерен, мкм	18,33			43,97			101,77			151,43		

Следует обратить внимание на то, что средние размеры зерен глин, полученные в результате проведенных исследований, оказались немного крупнее, чем они должны быть исходя из стандартной гранулометрической классификации. Этот факт объясняется тем, что “чистые” глины в осадочном разрезе не встречаются. В них обязательно присутствует в большем или меньшем количестве алевритовая фракция обломочных зерен, за счет которых средние размеры глин “сдвигаются” в сторону больших размеров.

Сопоставление результатов определения вклада или доли каждого из четырех выделенных литотипов в состав исследованных образцов упомянутой выше коллекции, полученных с помощью профилографа и по данным традиционного гранулометрического анализа, продемонстрировало хорошее соответствие между ними (рис. 4). Поскольку анализировались преимущественно песчано-алевритовые разновидности, то зависимость для глинистых образцов оказалась менее надежной и не такой представительной, как для этих фракций.

Полученные зависимости между амплитудой колебания алмазной иглы и размерами зерен, слагающих образцы, позволили провести чрезвычайно детальную дифференциацию состава полноразмерного керна, поднятого из того или иного интервала осадочного чехла (рис. 5).

Несмотря на кажущуюся простоту метода микропрофилирования, тем не менее существуют некоторые особенности обработки полученных с помощью этого метода данных. Эти особенности заключаются в следующем. При продольной распиловке керна алмазной пилой возможны два основных варианта поведения распиливаемой породы.

Первый вариант реализуется в случае распиливания пород, не имеющих прочного цемента, например карбонатного или кремнистого состава. В этом случае пила не распиливает обломочные зерна, а выкрашивает их из тела породы, поэтому на спиле образца остаются обломочные зерна с практически не измененной геометрической формой, что позволяет после очистки породы по специальной методике с помощью профилографа получать достоверные данные о ее гранулометрическом составе. Этот вариант реализуется главным образом тогда, когда цемент представлен глинистыми минералами.

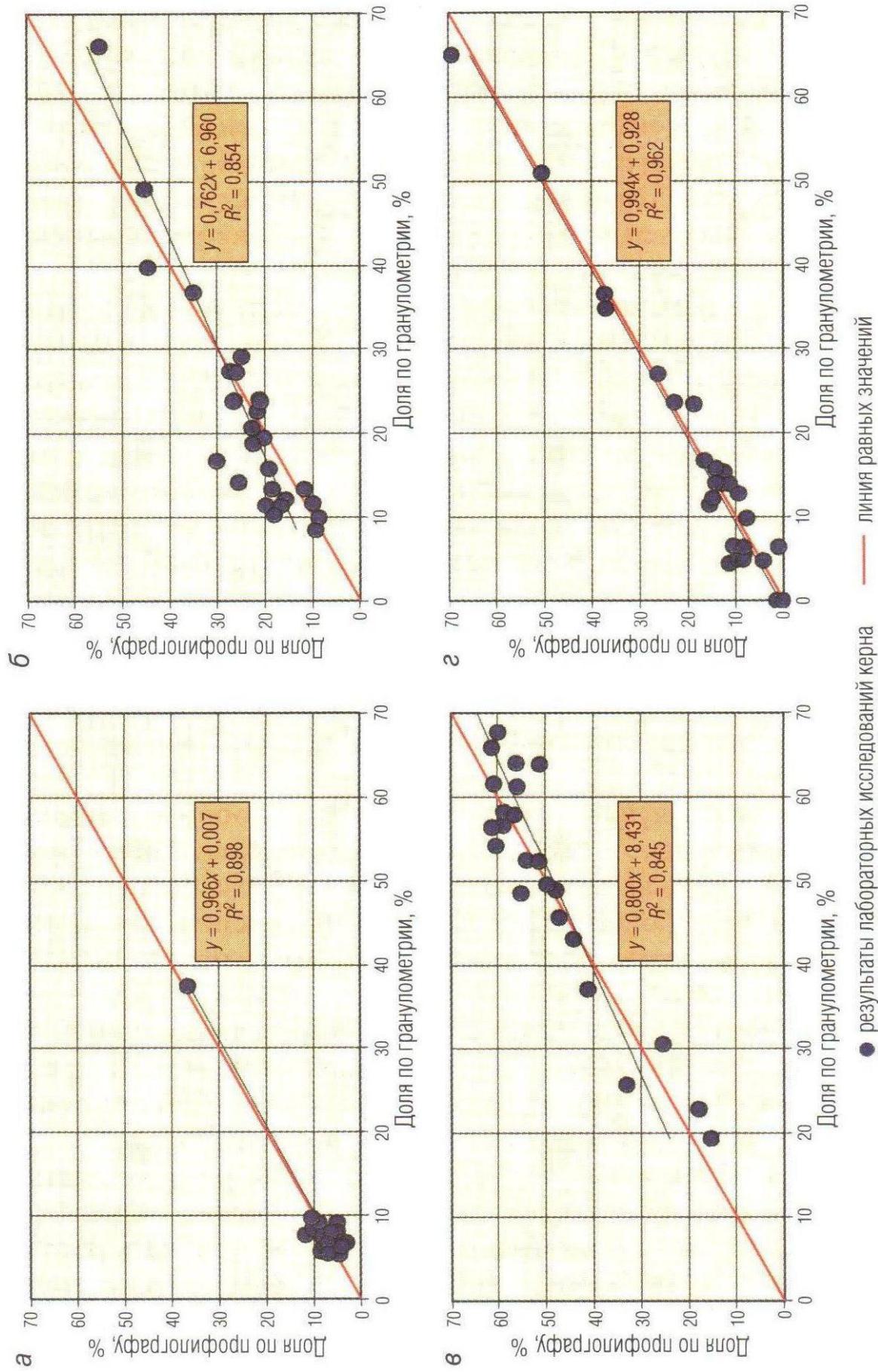


Рис. 4. Сопоставление результатов определения вкладов выделенных четырех литологических типов пород с использованием профилографа и данных гранулометрического анализа: а – глины; б – мелкозернистый алевролит; в – крупнозернистый алевролит; г – мелкозернистый песчаник

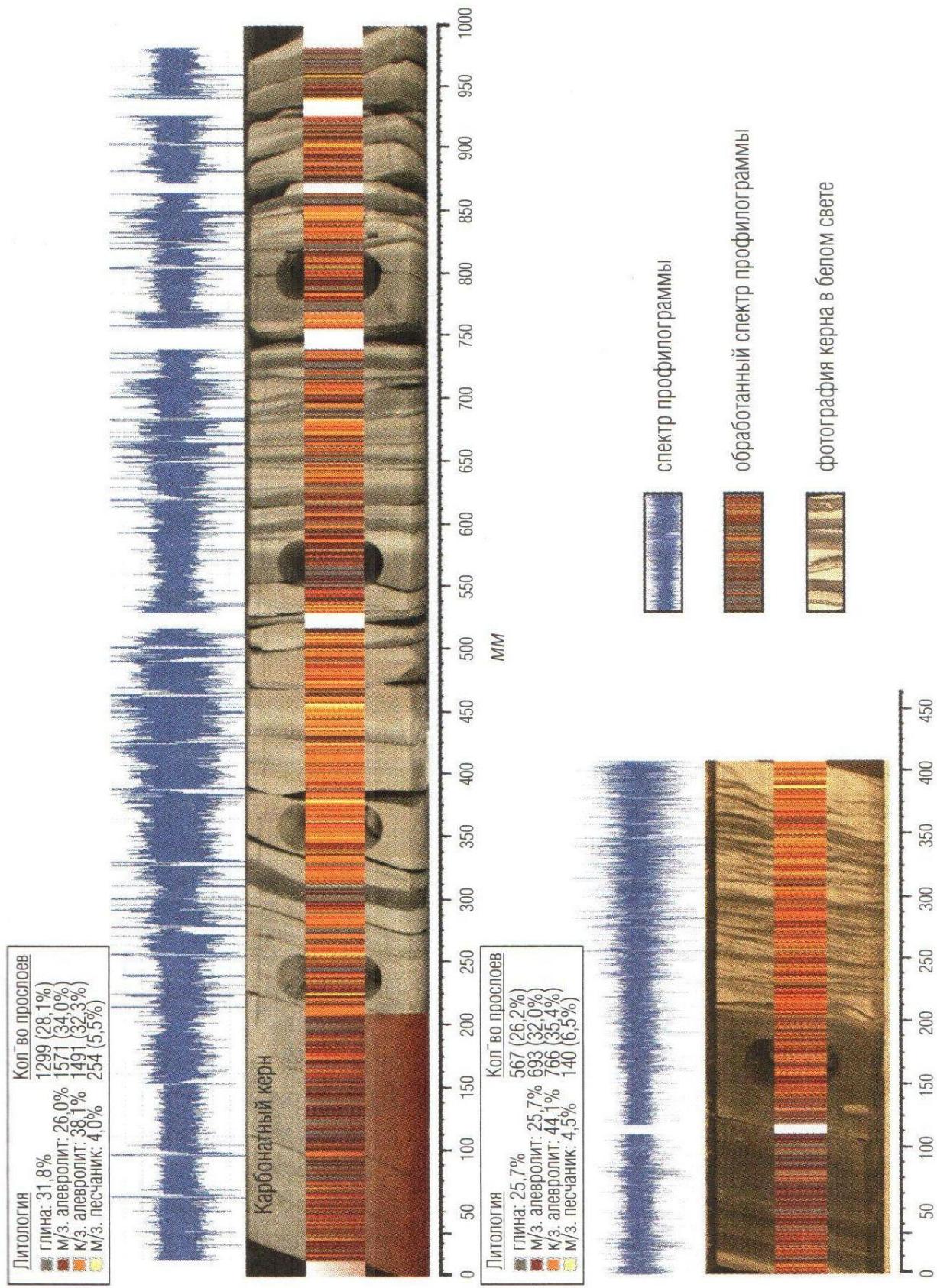


Рис. 5. Профилограммы срезов полноразмерного керна и результаты их интерпретации (викуловская свита)

Совершенно иная ситуация наблюдается в том случае, когда обломочные зерна прочно скреплены друг с другом, например карбонатным или кремнистым цементом. Когда обломочные зерна прочно скреплены друг с другом, они при разрезании пилой не выкрашиваются, а распиливаются, из-за чего меняется их геометрия и, соответственно, амплитуда вертикального перемещения алмазной иглы датчика. Поэтому на профилограмме участки, сложенные, например, песчаниками с карбонатным или кремнистым цементом, могут быть по внешнему виду похожи на те, которые получаются при микропрофилировании глин (рис. 5). В левой части колонок керна, приведенных на этом рисунке, хорошо видно, что интервал керна, скрепленного карбонатами (верхняя колонка керна), имеет примерно такую же по амплитуде запись профилографа, как глинистый интервал (нижняя колонка керна). По этой причине такие участки следует выделять на профилограммах и обрабатывать вручную. Хотя коллекторские свойства карбонатных песчаников будут близки по величине к таковым у глин, они, как и глины, будут отнесены к неколлекторам. То есть при оценке фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) карбонатных песчаников (при отнесении их по данным профилографа к глинам) больших ошибок с точки зрения оценки их ФЕС не будет. Кремнистый цемент (обычно конформно-регенерационного типа), так же как и карбонатный, с одной стороны, влияет на форму профилограмм, а с другой – на ФЕС образцов, поэтому для отложений с этим типом цемента тоже необходимо вносить соответствующие поправки.

Поскольку профилограф дает возможность построить чрезвычайно дифференциированную литологическую колонку исследуемого интервала полноразмерного керна, то существует соблазн, установив средние значения ФЕС выделенных четырех литотипов, спрогнозировать ФЕС любого интервала, зная его литологический состав (по данным микропрофилеметрии).

Для этого необходимо уточнить, что значения пористости  $k_p$  и водонедерживающей способности ( $k_{vc}$ ) являются скалярными величинами, а потому в силу их аддитивности значения  $k_p$  и  $k_{vc}$ , учитывающие вклад каждого из литотипов в эти параметры, являются мультипликативными. Проницаемость ( $k_{pr}$ ), напротив, представляет собой векторную величину, а потому не обладает свойством аддитивности, поэтому рассчитать ее величину, зная вклад каждого из литотипов в тот или иной образец, корректно невозможно, что будет видно чуть позже.

Итак, поскольку  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{вс}}$ , как было сказано выше, являются аддитивными величинами, то их значения можно представить в виде следующего выражения (на примере пористости):

$$k_{\text{п}} = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4, \quad (1)$$

где  $k_{\text{п}}$  – известная пористость по результатам определения ФЕС;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  – вклады различных литотипов, %;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_4$  – некоторые искомые значения  $k_{\text{п}}$  для каждой фракционной составляющей (глины, мелкозернистого алевролита, крупнозернистого алевролита и мелкозернистого песчаника соответственно).

Данную задачу можно отнести к задачам дискретной оптимизации и для нахождения величин  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_4$  было применено статистическое моделирование (а именно метод статистических испытаний, то есть метод Монте-Карло), которое широко применяется для решения задач из различных областей. Статистическое моделирование – это численный метод решения математических задач, при котором искомые величины представляют собой вероятностные характеристики какого-либо случайного явления. Это явление моделируется, после чего нужные характеристики приближенно определяются путем статистической обработки имеющихся “наблюдений” модели. Иными словами, для того чтобы оценить некоторое значение, необходимо подобрать случайную величину таким образом, чтобы ее математическое ожидание равнялось искомому значению. После этого можно получить случайную величину и оценить по выборке ее математическое ожидание. Полученный результат можно считать оценкой искомого значения. Стоит отметить, что нужна не любая, а достаточно достоверная оценка искомой величины, то есть оценка с малой погрешностью. Также для того, чтобы среднее арифметическое независимых реализаций случайной величины сходилось с вероятностью, равной единице, к ее математическому ожиданию, необходимо и достаточно, чтобы это математическое ожидание существовало.

Таким образом, рассматриваемая схема состоит в проведении серии экспериментов. Каждый  $i$ -й эксперимент представляет собой получение случайного исхода  $P_i$  и вычисление функции  $f(P_i)$ . После этого производятся вычисления по формуле

$$P_m = \frac{f(P_1) + f(P_2) + \dots + f(P_N)}{N}, \quad (2)$$

где  $P_m$  – пористость, найденная из статистических испытаний величин  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_4$ .

Данный результат считается оценкой искомой величины.

Случайный выбор на каждом этапе проводится с помощью случайных чисел, которые необходимо генерировать тем или иным образом. Так, они могут генерироваться каким-либо физическим датчиком или имитироваться при помощи вычислительной техники по некоторому алгоритму, обеспечивающему заданное распределение (псевдослучайные числа).

В решаемой задаче авторы пользовались именно псевдослучайными числами, так как значения  $x_1, x_2, x_3$  и  $x_4$  были заведомо ограничены, поскольку априори значение пористости для чистых глин меньше значения пористости для мелкозернистых алевролитов. В свою очередь, значение пористости для мелкозернистых алевролитов меньше значения пористости для крупнозернистых, а пористость последних меньше пористости мелкозернистых песчаников. То есть выполняется неравенство  $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$ .

Второе ограничение, принятое для оптимизации задачи, было введено исходя из коллекторских свойств керна. То есть были найдены предельные значения пористости для каждой из фракций:  $1 \leq x_1 \leq 14$ ;  $10 \leq x_2 \leq 23$ ;  $13 \leq x_3 \leq 26$ ;  $15 \leq x_4 \leq 30$ . Исключение составляли сильнопористые образцы, для сходимости результатов которых пределы незначительно повышались. Кроме того, известные искажения в полученные распределения вносили карбонатные образцы, пористость которых была явно ниже, чем у некарбонатных образцов.

Для нахождения величин была написана соответствующая программа на языке Matlab. Данная программа может работать как с массивами данных (матрицами), так и с единичными значениями (вектор-строка, вектор-столбец). Входными данными являются параметр  $P$  (которым могут быть  $k_{\text{пп}}, k_{\text{пр}}, k_{\text{вс}}$ ) в виде матрицы (вектор-столбца) 1 на  $n$  и параметры фракционного анализа методом микропрофилирования  $A$  в виде матрицы 4 на  $n$ . Далее образуется массив псевдослучайных чисел  $N$ .

Следующим шагом является формирование случайных матриц размером 4 на  $N$ , причем эти матрицы заполняются значениями в заданных границах, определенных из ФЕС образцов. Далее полученный массив сортируется по возрастанию сумм: первый элемент этой суммы – это минимум, который потом проверяется на действительность соблюдения неравенства  $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$ , то есть отсортирована ли соответствующая строка; если нет – берется следующий набор, по порядку возрастания невязки. В итоге на выходе получают значение,

которое имеет минимальную невязку и для которого выполняется соответствующее неравенство. Заключительным этапом является вывод данных в \*xlsx-файл.

Стоит особо отметить, что достоинством данного метода является малая величина погрешности при достаточно большом значении выборки. Так, при общем количестве элементов  $N$  согласно закону больших чисел оценка дает ошибку порядка  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ . Например, при выборке элементов, равной  $10^8$  (что соответствует используемому объему данных), математическая погрешность измерения будет равна всего 0,0001.

С помощью описанного метода по данным микропрофилирования были рассчитаны ФЕС выделенных четырех литологических типов пород, слагающих свиту. Для этого использовались интервалы микропрофилирования, соответствующие местам отбора цилиндрических образцов (рис. 5). Сопоставление результатов определения  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{вс}}$  расчетным способом с использованием метода микропрофилирования и по данным прямых лабораторных определений продемонстрировало наличие надежной связи этих параметров, полученных расчетным и лабораторным способами (рис. 6). Однако между значениями  $k_{\text{пр}}$ , полученными расчетным и лабораторным методами, значимой связи получить не удалось. Объяснение этому факту было дано выше. Оно заключается в том, что  $k_{\text{пр}}$  является векторной, а не скалярной величиной, а потому не обладает свойством аддитивности. По этой причине величина  $k_{\text{пр}}$  в значительной степени зависит не только от гранулометрического состава пород, но в еще большей степени от их текстурно-структурных особенностей, например наличия и пространственной ориентации слоистости, трещиноватости и т. п.

Проверка распределения ФЕС, полученных по результатам микропрофилирования, в пределах достаточно мощного интервала отложений викуловской свиты с данными лабораторных определений тех же параметров, показала весьма хорошую сходимость  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{вс}}$ , полученных обоими методами (рис. 7). Напротив, для  $k_{\text{пр}}$  однозначного совпадения ее значений, полученных обоими методами, не наблюдается. Хотя можно отметить некоторое сходство в поведении рассматриваемого параметра, полученного обоими методами.

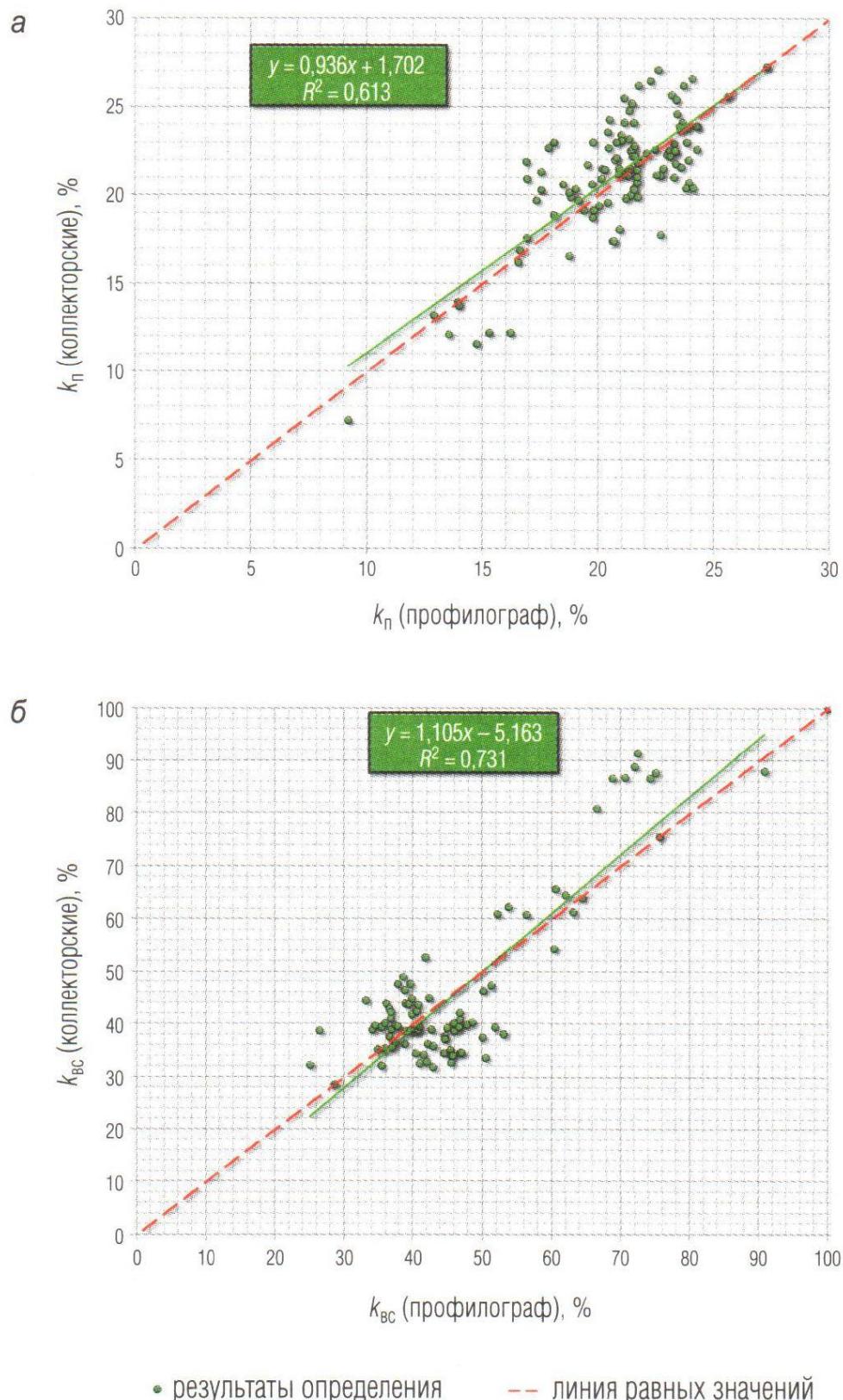


Рис. 6. Сопоставление результатов определения пористости (а) и водоудерживающей способности (б), полученных по данным лабораторных исследований и с использованием метода микропрофилирования

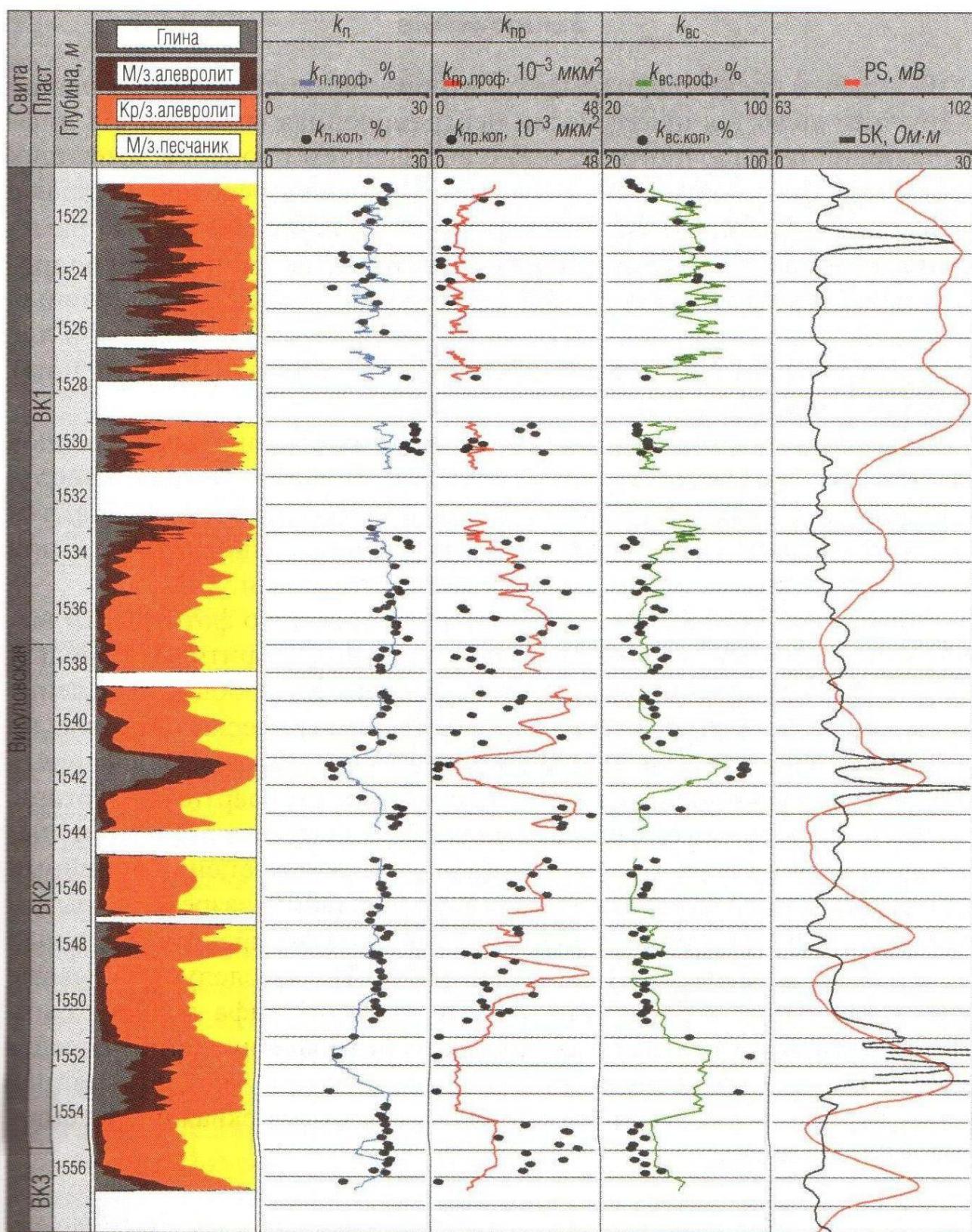


Рис. 7. Литолого-петрофизический разрез отложений викуловской свиты с отработанными результатами микропрофилирования и определения коллекторских свойств на образцах

## Заключение

Основным преимуществом рассматриваемого метода по сравнению с другими является практически неограниченная возможность дифференциации осадочного разреза с выделением прослоев, имеющих различный литологический и гранулометрический состав, начиная с первых мкм. Понятно, что такая дробность при практическом применении излишня, поэтому, например, при увязке данных микропрофилирования с ГИС есть смысл разбивать исследуемый осадочный разрез на участки, имеющие размеры, например, 10 или 20 см, и для этих участков рассчитывать объемное содержание в них выделенных четырех литотипов.

Выделение с помощью обсуждаемого метода различных литотипов происходит практически однозначно, в отличие от метода, использующего для этих целей фотографии полноразмерного керна, так как в последнем существует некоторая зона неоднозначности при проведении границ между различными литотипами.

Кроме того, не следует забывать, что с помощью фотографий выделяются всего два литотипа (глины и песчано-алевритовые породы), а с помощью профилографа возможно бесконечно дробное выделение различных типов пород исходя из их гранулометрического состава, но в настоящей работе была использована классическая классификация, в соответствии с которой выделены лишь четыре стандартных литотипа.

Возможность с помощью профилографа получать расчетные значения  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{вс}}$  позволяет оперативно осуществлять оценку линейных извлекаемых запасов углеводородов в продуктивном разрезе, вскрытом той или иной скважиной, из которой был поднят представительный керн (М. Ю. Зубков, В. П. Косяков, 2012). Но не следует забывать, что для решения этой задачи данные профилографа должны быть нормированы по результатам литолого-петрофизических исследований, выполненных на керне соседних скважин, или, по крайней мере, керне одновозрастных пород, поднятом из скважин рассматриваемого района.

*Рецензенты доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов,  
канд. геол.-минер. наук В. Г. Мамяшев*