

# Сейсморазведка высокой четкости (СВЧ) — бескомпромиссный подход к регистрации и обработке сейсмических данных

**А.А. Табаков**

к.т.н., генеральный директор<sup>1</sup>  
vsp@geovers.ru

**В.Н. Ференци**

ведущий геофизик<sup>1</sup>  
vfern@mail.ru

**Л.В. Калван**

геофизик<sup>1</sup>  
lyuba.kalvan@gmail.com

**Ю.А. Степченков**

физик-программист<sup>2</sup>  
urij.stepchenkov@gmail.com

**А.С. Колосов**

геофизик-программист<sup>2</sup>  
kolosovas@gmail.com

<sup>1</sup>ООО «Геоверс», Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Универсальные Интеллектуальные Системы», Санкт-Петербург, Россия

**На основе анализа ограничений методики сейсморазведки на поверхности и использования подходов, разработанных в методе ВСП, предлагаются усовершенствования полевых работ и обработки данных. В результате предполагается увеличить информативность сейсморазведки примерно в 2 раза за счет увеличения ширины спектра с 3–3.5 октав до 7 октав, что позволяет называть такую технологию «Сейсморазведкой высокой четкости» (СВЧ). Представлены результаты применения разработки на модельных и реальных данных, полученных в сложных условиях.**

**Материалы и методы**

Сейсморазведка высокой четкости.

**Ключевые слова**

сейсморазведка на поверхности, вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), трехмерная геометрия наблюдений, высокая четкость, инновация, ширина спектра

**Введение**

Многие концепции современных приемов регистрации, обработки и интерпретации данных сейсморазведки исходят из традиционных подходов, основанных на упрощенных моделях строения геологической среды и соответствующих им упрощенных алгоритмах обработки.

Построенные на этих концепциях технологии позволяют во многих случаях получать удовлетворительные и даже хорошо согласующиеся с данными бурения результаты, но в условиях, которые сильно отклоняются от упрощенных моделей, например, в зонах вариаций мощностей многолетне мерзлых пород (ММП) в верхней части разреза, в горных районах и других — заключения по данным сейсморазведки не являются объективным критерием для проектирования бурения или источником надежной информации для построения моделей продуктивных пластов.

В статье предложен и описан комплекс концепций и технологий, основанных на фундаментальных подходах, устраняющих очевидные противоречия и недостатки, ограничивающие рост эффективности применения метода сейсморазведки. Основные положения этого комплекса не являются принципиально новыми, во всяком случае, они уже применяются с конца 70-х годов в разработке определенных направлений метода вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

В статье обращается внимание на потенциальную эффективность предлагаемых инноваций. Поскольку важнейшим достижением нового подхода является существенное увеличение ширины спектра выделяемых отражений, которое приводит к получению более четких изображений строения среды, метод получил название Сейсморазведки

Высокой Четкости (СВЧ — High Definition Seismic).

**Основные положения**

Существенные недостатки общепринятых методик наземной сейсморазведки в целом заключаются в следующем:

- Фактическая двумерность системы наблюдений 3D очевидно неадекватна трехмерным средам.
- Невозможность регистрации формы импульса возбуждения.
- Установка сейсмоприемников без достаточного прижима к грунту, что приводит к появлению резонансов.
- Полный вектор колебаний либо не регистрируется, либо не используется в полной мере из-за неадекватности систем обработки.
- Не регистрируются шумы до начала записи (опережение начала записи), что не позволяет оценивать и использовать при обработке свойства шумов.
- При использовании вибрационных источников ширина спектра возбуждения ограничивается 3–3.5 октавами.
- Концепция статических поправок не соответствует реальности при наличии высокоскоростных слоев в ВЧР.

В связи с этим отмечается ряд принципиальных ограничений:

- Селекция волновых полей выполняется как процедура выделения сигналов на фоне помех, тогда как с фундаментальной точки зрения это задача анализа интерференционных волновых полей, и селекция является частью итеративного процесса.
- Статические поправки рассматриваются как общая для всех времен компонента, что не соответствует реальности в условиях сильной латеральной неоднородности верхней части разреза (ВЧР) и наличия в

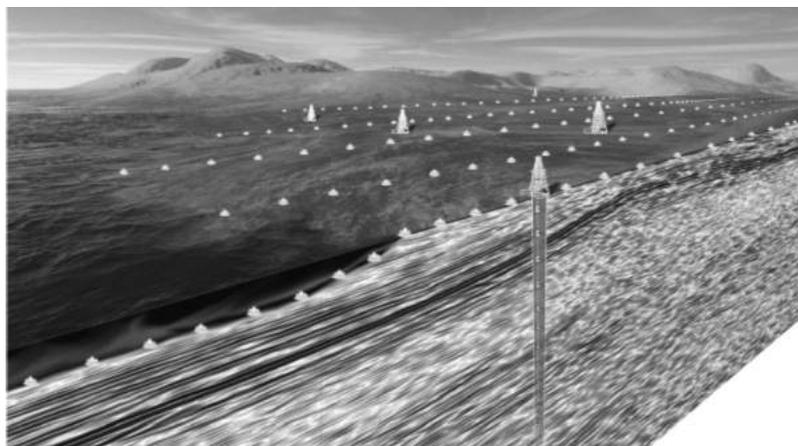


Рис. 1 — Схематическое изображение трехмерной системы наблюдений в технологии СВЧ

ней высокоскоростных включений.

- Оцениваемые переборами параметры гипербола интерпретируются как информация о скоростной модели, что в условиях, описанных в предыдущем пункте, не работает в силу сильного отличия годографов отражений от гипербола.
- Используемая концепция линии приведения имеет ограниченное применение и не пригодна для сложных геологических моделей, например, в условиях горного рельефа.
- Алгоритмы миграции не соответствуют сути решаемых задач при условии больших углов наклона, что ясно проявляется при рассмотрении объектов шарообразной формы.
- Не разработана концепция количественного использования динамических характеристик обменных волн для обработки трехкомпонентных данных.
- Сложность и многовариантность систем обработки требует высоких затрат на обучение персонала.

Для устранения приведенных выше принципиальных ограничений метода сейсморазведки новая технология предлагает реализовать следующие подходы:

а) В области регистрации:

- Использовать трехмерные системы наблюдения, включающие данные поверхностной сейсморазведки 3D и скважинные наблюдения по методу вертикального сейсмического профилирования

(3D+ВСП), обеспечивающие оценку истинных скоростей и истинной формы импульса возбуждения.

- Полностью перейти на регистрацию трехкомпонентными датчиками.
- Выполнять запись сейсмического фона до возбуждения.
- Сократить шаг наблюдений и увеличить вынос.
  - б) В области обработки данных:
    - Использовать предлагаемый ниже способ аддитивного итеративного анализа волновых полей вместо выделения сигналов на фоне помех.
    - Вычислять переменные во времени выравнивающие сдвиги вместо статических поправок.
    - Использовать для описания реальных годографов дополнительно к гиперболам корректирующие полиномы необходимой степени.
    - Формировать изображение волнового поля с использованием скоростной модели среды, рассчитанной по реальным годографам (сумма выравнивающих поправок, гиперболы и полиномы), от поверхности, полученной скоростной инверсией годографов первых вступлений.
    - Использовать обменные поперечные волны для компенсации зависимости величины коэффициента отражения продольных волн от угла падения путем суммирования отражений продольных и поперечных волн с расчетными весами.

- Использовать векторную конечно-разностную миграцию для получения динамически представительных результатов.
- Использовать элементы искусственного интеллекта для автоматизации процесса обработки.

Применение рекомендуемого комплекса может увеличить ширину спектра со стандартных 3–3.5 октав до 7 октав, как это будет продемонстрировано на реальных данных, полученных в условиях меняющихся мощностей зоны ММП, при интенсивных звуковых, ветровых, техногенных помехах и больших перепадах рельефа.

**Трехмерные системы наблюдений**

Единственной полностью адекватной геометрии наблюдений для изучения трехмерных сред является трехмерная. В реальности вертикальная координата может быть реализована при проведении наблюдений в скважине, тогда возможно построение квазитрехмерной геометрии наблюдений, как в предлагаемой ниже методике 3D + ВСП [1, 4, 5, 6, 7]. Термин требует пояснений. «3D» — это традиционная площадная сейсморазведка на поверхности, а «+ВСП» означает, что третья ось координат может быть реализована только в имеющейся на площади системе скважин.

Геометрия размещения сейсмоприемников при проведении работ 3D+ВСП в технологии СВЧ схематически изображена на рис. 1.

Применение технологии на практике

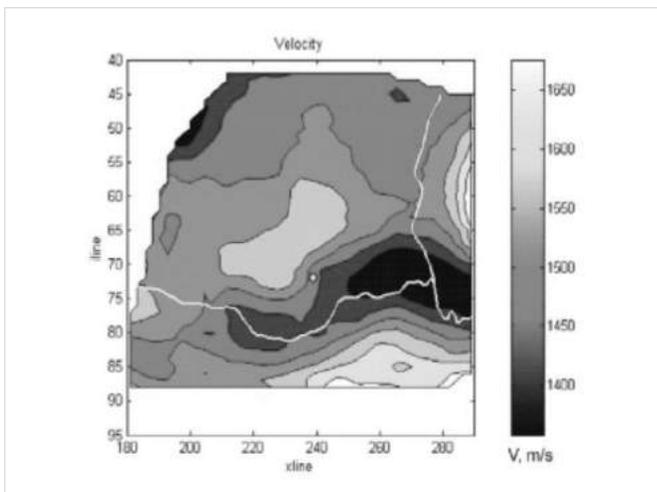


Рис. 2 — Результаты оценки скоростей ВЧР, включающей ММТ, по результатам 3D+ВСП на одной из площадей Западной Сибири

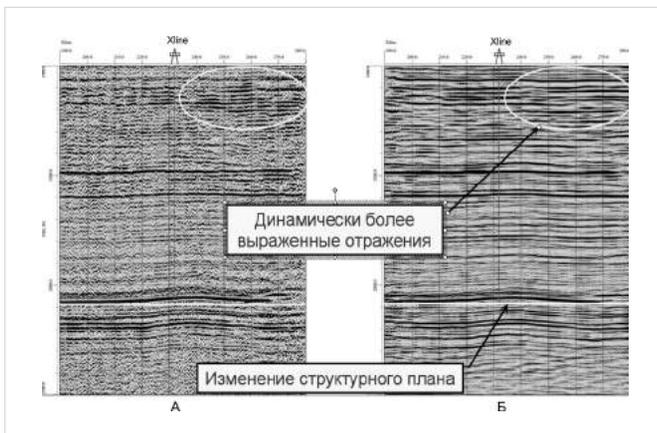


Рис. 3 — Сопоставление сечений куба 3D (А) и 3D+ВСП (Б) на одной из площадей Западной Сибири

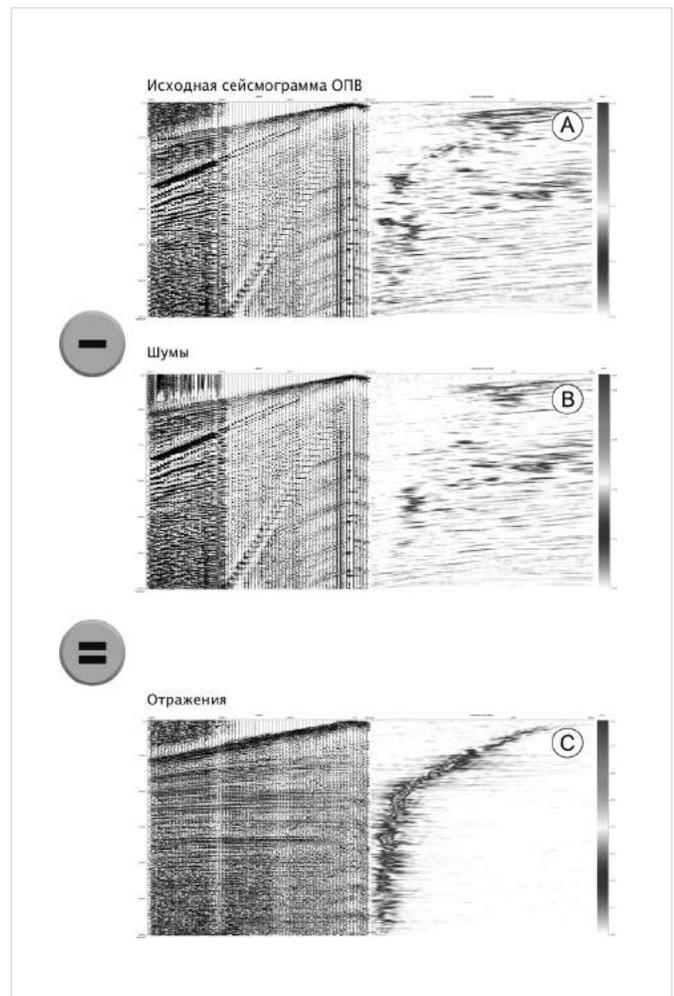


Рис. 4 — Селекция волновых полей сейсмограмм на поверхности А — исходная сейсмограмма; В — сейсмограмма выделенных шумов; С — остатки (отражения + нерегулярный шум)

означает, что одновременно с проведением поверхностных наблюдений производится регистрация сигналов в скважине и, таким образом, устраняются два принципиальных ограничения наземной сейсморазведки — невозможность определения истинных скоростей и истинной формы сигнала.

На рис. 2 приведен пример определения скоростей в ВЧР, включающей ММП на одной из площадей Западной Сибири с помощью наблюдений 3D+ВСП. Зоны понижения скоростей хорошо коррелируют с зонами растяжения вдоль русел малых рек. Вариации скоростей ВЧР определены по разнице модельных и фактических времен прихода прямых волн на глубинном приборе вблизи забоя.

На рис. 3 приведено сопоставление временных разрезов, полученных по одним и тем же данным 3D на поверхности с использованием одновременных наблюдений ВСП вблизи забоя скважины (В) и без него (А).

Хорошо заметны различия в структурном плане за счет учета вариаций ММП и в динамике отражений — устранение резонансных явлений благодаря стандартизации сигналов по данным ВСП.

#### Анализ волновых полей

Зарегистрированные сейсмограммы волновых полей представляют собой интерференцию упругих полезных волн, волн-помех различного типа и квазислучайных помех различного типа. Ширина спектра полезных волн, в котором обеспечивается заданное отношение сигнал/шум, используемых в дальнейших преобразованиях и интерпретации, зависит от успешности процедуры разделения волновых полей. В классе линейных систем эта задача решается как оптимальная многоканальная фильтрация. Недостатком этого подхода является необходимость использования на входе параметров разделяемых волн, которые могут быть определены после разделения.

В данной работе представлены результаты использования альтернативного подхода — адаптивного итеративного метода, который впервые был предложен С.А. Нахамкиным [2, 3]. С 1970 г. метод развивается сотрудниками ООО «Геоверс» и реализован для обработки данных ВСП [9], а так же успешно применяется для обработки первичных сейсмограмм наземной сейсморазведки.

Суть метода заключается в том, что сначала выявляется наиболее сильный сигнал сейсмической записи, оцениваются его параметры, ищется проекция сигнала в поле параметров и затем выделенный сигнал с найденными параметрами вычитается из волнового поля. После последовательного выделения всех или части отражений возможно провести уточнение каждого сигнала путем выделения его из суммарного поля остатков и искомой волны, исключив при этом искажающее влияние интерференции остальных сильных отражений. В результате этой процедуры получается аддитивный набор сигналов и остатки, которые не превышают заданного порога относительно выделенных сигналов, либо содержат только нерегулярные сигналы.

При селекции все выделяемые сигналы равноценны и их разделение на полезные и помехи разных типов выполняется после завершения анализа. Тем не менее, для основных типов отражений задается модель и

выделение каждого сигнала выполняется путем нахождения ближайшей проекции на область допустимых решений, чем достигается решение проблемы единственности.

Однако эта задача не только не соответствует принципу единственности решения, но может и расходиться. Для решения этой проблемы эмпирически подобраны адаптивные и в том числе нелинейные процедуры, обеспечивающие правдоподобные устойчивые решения.

На рис. 4 приведен пример анализа реальной сейсмограммы, зарегистрированной на поверхности (4А). Результаты анализа представлены суммой всех регулярных шумов (4В) и разницы между исходной сейсмограммой и совокупностью шумов (4С). Помещенные там же результаты перебора скоростей (слева) показывают, что в поле помех отсутствуют разрастания, связанные с полезными волнами, эти разрастания начинают доминировать после вычитания шумов.

#### Оценка статических поправок по методу «Поликор» и результаты применения технологии в условиях ММП

Система «Поликор», предложенная одним из авторов более 30 лет назад, основана на корреляции трасс равных удалений и

корреляции и накапливании рядов корреляционных функций. Особенностью этой системы является независимость статпоправок за ПВ и ПП и неиспользование информации о скоростях.

На рис. 5 приведены статические поправки, определенные в условиях Восточной и Западной Сибири. На левом рисунке видно, что поправки за ПВ и ПП с особенностями длиной 20 км хорошо совпадают друг с другом и с рельефом.

На рис. 6 приведены временные разрезы ОГТ, полученные по технологии СВЧ (слева) и по стандартной технологии с использованием наиболее известных мировых систем обработки (справа).

По оценке авторов относительная гладкость отражающих горизонтов более адекватна морским условиям осадконакопления в условиях Западной Сибири. На разрезе, полученном по стандартной технологии, отсутствует антиклинальный перегиб из-за недостоверных статических поправок и известный по геологическим данным косослоистый горизонт на временах 2400–2450 мс.

#### Итоги

Предположенные концепции Сейсморазведки Высокой Четкости реализованы на

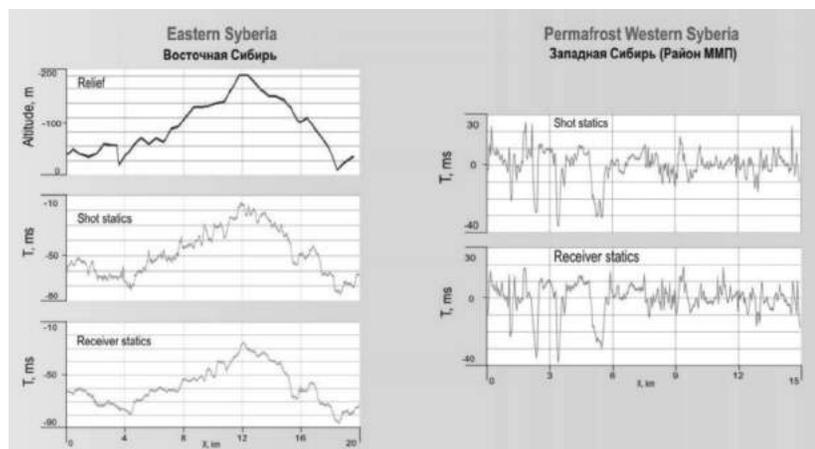


Рис. 5 — Оценка статических поправок по методу «Поликор» в условиях Восточной Сибири (слева) и Западной Сибири (справа)

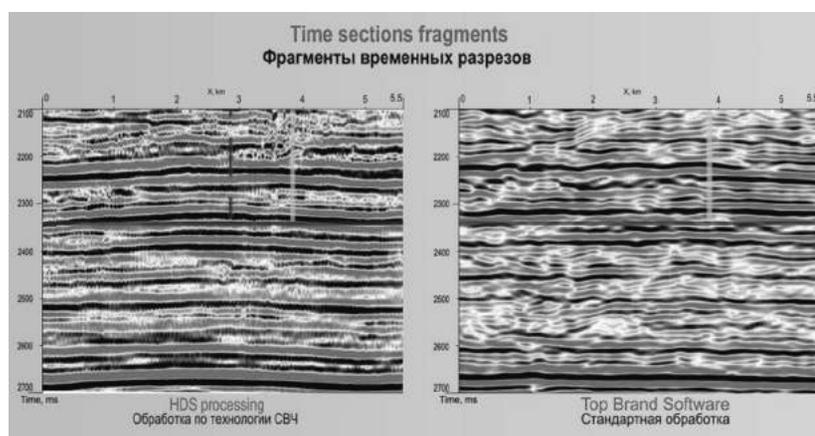


Рис. 6 — Фрагмент временного разреза ОГТ в условиях севера Западной Сибири (ММП) по технологии СВЧ (слева) и по стандартной технологии

нескольких примерах в сложных условиях ММП в Западной и Восточной Сибири с положительными результатами.

#### Выводы

Результаты опробования технологии СВЧ показывают возможность значительного повышения эффективности сейсморазведки в условиях ММП.

#### Список используемой литературы

1. Баранов К.В., Бикеев В.С., Стариков Н.В., Табаков А.А. Результаты применения методики 3D+ВСП локальный проект и 2D+ВСП локальный проект в условиях Западной Сибири // Технологии сейсморазведки. 2014. №1. С. 19–22.
2. Нахамкин С.А. Оптимальный алгоритм выделения сейсмических волн на фоне регулярных волн-помех // Известия АН СССР сер. Физика Земли. 1966. №5. С. 52–60.
3. Нахамкин С.А. Математические алгоритмы вычитания регулярных помех при разделении сейсмических волн // Известия АН СССР сер. Физика Земли. 1966. № 5. С. 23–31.
4. Табаков А.А., Бикеев В.С., Баранов К.В., Яковлев И.В., Барков А.Ю. Методика совмещенных наземно-скважинных наблюдений Локальный проект 3D+ВСП для детального изучения околоскважинного пространства: сборник тезисов докладов научно-практической конференции Состояние и перспективы развития метода ВСП. Москва. 2001. С. 32–34.
5. Tabakov A.A. 3D Acquisition Geometries as the Way to Overcome Drawback of Conventional Seismic Technologies. Translations of International Borehole Geophysical Symposium. Kunming, China, 2006, pp. 1–4.
6. Tabakov A.A., Baranov K.V. Integrated land seismic and VSP survey geometries offer improved imaging solution. First Break journal, 2007, issue 25, pp. 97–101.
7. Табаков А.А. Трехмерные системы наблюдений — новый этап в развитии нефтегазовой геофизики // Геофизика. 2007. №4. С. 153–156.
8. Табаков А.А., Елисеев В.Л., Мухин А.А., Степченков Ю.А., Огуенко Д.В. Сейсморазведка Высокой Четкости (СВЧ) — бескомпромиссный подход к регистрации и обработке сейсмических данных. Тезисы докладов на конференции Гальперинские чтения. 2009. С. 5–7.
9. Ференци В.Н., Табаков А.А., Севастьянов Л.В., Фурсова Е.А., Елисеев В.Л. Автоматическая селекция волн при модельбазированной обработке данных ВСП // Технологии Сейсморазведки. 2008. С. 35–39.

ENGLISH

GEOPHYSICS

## High definition seismic (HDS) — uncompromised approach to acquisition and processing of seismic data

UDC 550.3

#### Authors:

**Alexander A. Tabakov** — ph.d., chief executive<sup>1</sup>; [vsp@geovers.ru](mailto:vsp@geovers.ru)

**Valery N. Ferenczi** — senior geophysicist<sup>1</sup>; [vfern@mail.ru](mailto:vfern@mail.ru)

**Lyubov' V. Kalvan** — geophysicist<sup>1</sup>; [lyuba.kalvan@gmail.com](mailto:lyuba.kalvan@gmail.com)

**Yuriy A. Stepchenkov** — physicist programmer<sup>2</sup>; [urij.stepchenkov@gmail.com](mailto:urij.stepchenkov@gmail.com)

**Aleksey S. Kolosov** — geophysicist-programmer<sup>2</sup>; [kolosovas@gmail.com](mailto:kolosovas@gmail.com)

<sup>1</sup>Geovers, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Universal Smart Systems, St.Petersburg, Russian Federation

#### Abstract

Based on analysis of restrictions of surface seismic prospecting and application of approaches invented for VSP processing the improvements in acquisition and processing of seismic data are proposed. It is supposed that informative content of seismic result may be approximately doubled due to widening of band-width from 3–3.5 octaves to 7 octaves. The technology is called «High Definition Seismic» (HDS). The technology is illustrated by application

to model and real data obtained in complex surrounding.

#### Materials and methods

High definition seismic.

#### Results

Assumptions of seismic High Definition implemented several examples in difficult conditions of the IMF in Western and Eastern Siberia with positive results.

#### Conclusions

Results of application of HDS show that proposed technology provides sufficiently more efficient results of seismic prospecting in presence of permafrost layers.

#### Keywords

seismic prospecting, vertical seismic profiling, three-dimensional geometry of survey, high definition, innovation, spectrum width

#### References

1. Baranov K.V., Bikeev V.S., Starikov N.V., Tabakov A.A. *Rezultaty primeneniya metodik 3D+VSP lokal'nyy proekt i 2D+VSP lokal'nyy proekt v usloviyakh Zapadnoy Sibiri* [Results for applying the 3D + VSP local project and 2D + VSP local project in Western Siberia]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2014, issue 1, pp. 19–22.
2. Nakhmkin S.A. *Optimal'nyy algoritm vydeleniya seysmicheskikh voln na fone regulyarnykh voln-pomekh* [Optimal allocation algorithm of seismic waves on the background of regular waves-interference]. *Fizika Zemli, Izvestiya USSR Academy of Sciences*, 1966, issue 5, pp. 52–60.
3. Nakhmkin S.A. *Matematicheskie algoritmy vychitaniya regulyarnykh pomekh pri razdelenii seysmicheskikh voln* [Mathematical algorithms subtraction regular interference in the separation of seismic waves]. *Fizika Zemli, Izvestiya USSR Academy of Sciences*, 1966, issue 5, pp. 23–31.
4. Tabakov A.A., Bikeev V.S., Baranov K.V., Yakovlev I.V., Barkov A.Yu. *Metodika sovmeshchennykh nazemno-skvazhinnykh nablyudeniy Lokal'nyy proekt 3D+VSP dlya detal'nogo izucheniya okoloskvazhinnoy prostranstva* [Technique combined land-borehole observations Local project 3D + VSP for detailed study borehole environment]. Book of abstracts of scientific and practical conference Status and prospects of VSP, Moscow, 2001, pp. 32–34.
5. Tabakov A.A. 3D Acquisition Geometries as the Way to Overcome Drawback of Conventional Seismic Technologies. Translations of International Borehole Geophysical Symposium. Kunming, China, 2006, pp. 1–4.
6. Tabakov A.A., Baranov K.V. Integrated land seismic and VSP survey geometries offer improved imaging solution. First Break journal, 2007, issue 25, pp. 97–101.
7. Tabakov A.A. *Trekhmernye sistemy nablyudeniy — novyy etap v razvitiy neftegazovoy geofiziki* [Three-dimensional observation system is new stage in the development of petroleum geophysics]. *Geofizika*, 2007, issue 4, pp. 153–156.
8. Tabakov A.A., Eliseev V.L., Muxhin A.A., Stepchenkov Yu.A., Oguenko D.V. *Seysmorazvedka Vysokoy Chetkosti (SVCh) — beskompromissnyy podkhod k registratsii i obrabotke seysmicheskikh dannykh*. [High Definition Seismic» (HDS) — uncompromising approach to the registration and processing of seismic data]. Abstracts of the conference Galperin Readings. 2009, pp. 5–7.
9. Ferentsi V.N., Tabakov A.A., Sevast'yanov L.V., Fursova E.A., Eliseev V.L. *Avtomaticheskaya selektsiya voln pri modelbazirovannoy obrabotke dannykh VSP* [Automatic selection of waves at modelbazirovannoy VSP data processing]. *Tekhnologii Seysmorazvedki*, 2008, pp. 35–39.