

УДК 534:621.382

## СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ СЕЙСМОВИБРАТОРОВ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА–АТМОСФЕРА

<sup>1,2)</sup> Хайретдинов М.С., <sup>1)</sup> Ковалевский В.В., <sup>1,2)</sup> Воскобойникова Г.М., <sup>1)</sup> Седухина Г.Ф., <sup>1,2)</sup> Якименко А.А.

<sup>1)</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*  
<sup>2)</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Изучение взаимодействия разных геофизических полей весьма актуально для предсказания геоэкологических рисков, обусловленных техногенными и природными взрывами. В этой связи рассматривается и исследуется предложенный авторами вибрационный метод изучения геофизических полей. Благодаря высоким метрологическим и экологическим характеристикам сейсмических вибраторов достигаются высокие точность и повторяемость результатов исследований в рассматриваемой области, а также экологичность их получения. Результаты исследований обоснованы теоретически и экспериментально.

### ВВЕДЕНИЕ

Многие природные и техногенные процессы сейсмической природы сопровождаются образованием сопряженных процессов в атмосфере. В первую очередь, это касается образования акустических полей. В качестве примера на рисунке 1 процесс акустического возмущения атмосферы иллюстрируется по отношению к трем разным источникам – техногенному землетрясению (эпицентр – угольный разрез «Бачатский», дата 19.06.2013, магнитуда 5,3–5,6), сейсмовибратору ЦВ-40, полигонным взрывам малой мощности.

Приведенные записи отражают процесс образования акустических волн, сопровождающих процессы излучения и распространения сейсмических волн. При этом уровни акустических волн в отдельных случаях сопоставимы, а иногда выше уровней сейсмических волн. В первую очередь, это относится к поверхностным источникам сейсмических и

акустических волн, что определяет целесообразность учета параметров акустических волн наряду с сейсмическими в задачах геофизического мониторинга окружающей среды, а также в решении некоторых прикладных задач сейсмологии. Так, например, из рисунка 1-б следует, что акустические волны по отношению к сейсмическим от наземного вибрационного источника по критерию помехозащищенности выражены в равной мере. На основе данного типа источника, обладающего высокой экологичностью и метрологической точностью, возможно построение вибрационных технологий для решения задач активного геофизического мониторинга окружающей природной среды [1–4]. В связи с этим в статье рассмотрены физические факторы, определяющие количественные характеристики излучения и дальнего распространения акустических волн, генерируемых сейсмическими вибраторами.

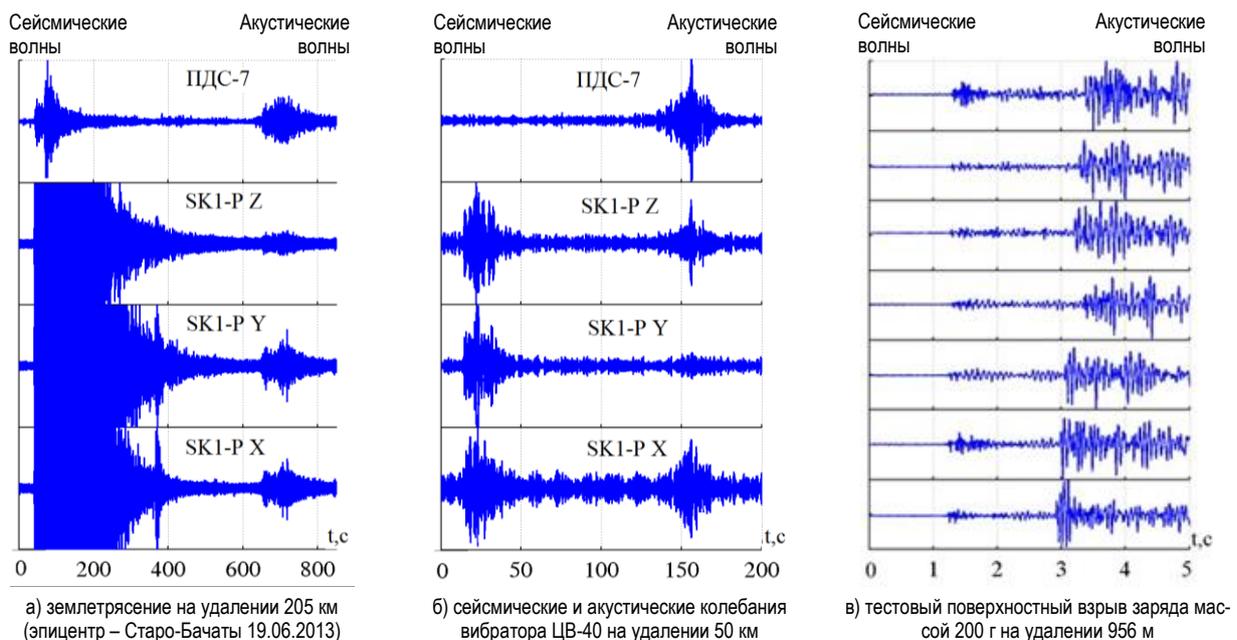


Рисунок 1. Трехкомпонентные записи сейсмических и акустических волн на выходах сейсморегистратора SK1-P и пьезореципитора ПДС-7 (а, б) и записи сейсмических и акустических волн от сейсмоматрицы СВ-5 (в)

**АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО  
ВИБРАТОРА**

Полная мощность инфразвукового излучения акустических колебаний вибратора в атмосферу  $W^a$  ориентировочно может быть оценена для случая, когда скорость акустической волны  $c_a$  равна скорости поперечной сейсмической волны  $v_s$ , т. е.  $c_a = v_s$ , а скорость продольной волны  $v_p = \sqrt{3}v_s$ . В этом случае акустическая мощность излучения в атмосферу составит [5]

$$W^a = \frac{3,16 \cdot \rho_a F^2 \omega^2}{\pi \rho^2 v_p^3}.$$

Здесь  $\rho_a, \rho$  – плотность воздуха и грунта под источником;  $F, \omega$  – возмущающая сила и частота колебаний, излучаемые источником;  $v_p$  – скорость продольных волн.

В тоже время сейсмическая мощность излучения составляет

$$W^p = 0,085 \cdot \frac{F^2 \omega^2}{\pi \rho v_p^3}.$$

Из сравнения приведенных соотношений следует, что  $W^a/W^p \sim 0,02$ . Так например, если  $F = 100$  т,  $f = 10$  Гц,  $\rho_a = 1$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_a = 340$  м/с,  $v_p = \sqrt{3}c_a = 590$  м/с, тогда  $W^p = 1500$  Вт,  $W^a = 30$  Вт.

С учетом приведенного соотношения мощностей акустическая мощность излучения составит лишь 30 Вт. Несмотря на значительную разницу в соотношении излучаемых мощностей акустические колебания от вибратора при определенных метеоусловиях могут распространяться и регистрироваться на значительных удалениях от источника [6–8]. Это объясняется тем, что акустические волны в атмосфере затухают в меньшей степени в сравнении с сейсмическими волнами в земле, обладающей более выраженной неоднородностью геологического строения. С другой стороны, благодаря высоким метрологическим характеристикам излучения вибрационных колебаний открывается возможность их синхронного накопления на фоне шумов, в частности, методами взаимокорреляционной свертки [6].

С другой стороны, дальнему распространению акустических волн способствует ряд благоприятных физических факторов, включающих в себя:

1. Призмное распространение акустического волнового фронта благодаря [9]:

- явлению температурной инверсии, связанному с образованием низкотемпературного слоя воздуха у поверхности земли при переходе от холодной ночи к теплему дню;

- метеофакторной зависимости, обуславливающей возрастание скорости распространения акустической волны и акустического давления при совпадении направлений распространения акустического волнового фронта и ветра. Сюда же следует отнести менее выраженную метеозависимость от влажности.

Для этих факторов с учетом [9] зависимость акустического давления  $p$ , которое несет в себе волновой фронт, может быть представлена в виде:

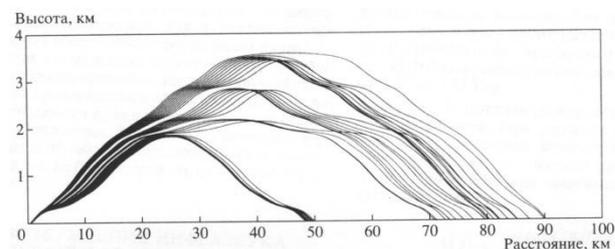
$$p = \frac{p}{\gamma} (331 + 0,6 \cdot t + 0,07 \cdot e + w_0 \cdot \cos \varphi)^2. \quad (1)$$

Здесь  $t, e$  – температура и влажность воздуха соответственно,  $w_0$  – скорость ветра,  $\varphi$  – угол между направлением фронта распространения акустической волны и направлением ветра,  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $\gamma = c_p / c_v$  – коэффициент, характеризующий, отношение теплоемкостей среды при постоянном давлении ( $c_p$ ) и при постоянном объеме ( $c_v$ ).

2. Отражение акустических волн от верхних слоев атмосферы. На рисунке 2 приводятся теоретически рассчитанные траектории инфразвуковых волн, построенные с учетом эффектов отражения для условий атмосферы, близких по времени к экспериментально выполненным сеансам вибрационного зондирования на линейном профиле протяженностью 100 км [10]. На рисунке 2-а представлены высотные профили температуры  $T$  (°C), компоненты горизонтального ветра  $U_x$  (м/с) вдоль направления источник-приемник. Как следует из расчетов, уверенная регистрация отраженных акустических волн может происходить на дальностях ~50 и 100 км от источника. Это объясняет принципиальную возможность регистрации слабых акустических волн на больших дальностях.



а) высотные (в км) профили температуры  $T$ , компоненты горизонтального ветра  $U_x$  (м/с) по данным радиозонда (для 5ч 30 мин местного времени, летнее время), высоты отражения  $Z_{отр}$

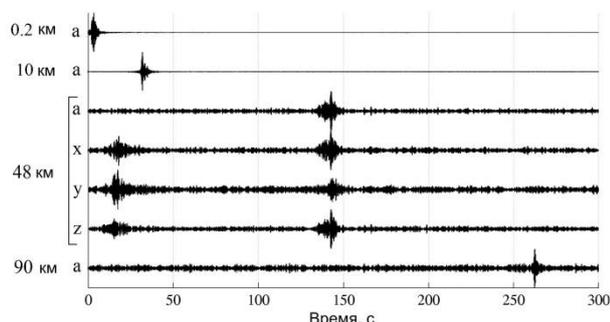


б) траектории инфразвуковых волн

Рисунок 2. К результатам расчета траектории инфразвуковых волн с учетом эффектов отражения для условий атмосферы, близких по времени к экспериментам вибрационного зондирования

Экспериментальным подтверждением этого вывода являются результаты одновременного накопления сейсмических и акустических волн с помощью

взаимокорреляционной свертки продолжительных во времени сейсмических и акустических колебаний (рисунок 3) от центробежного вибратора ЦВ-40 (рисунок 4) на линейном профиле протяженностью 100 км (рисунок 5).



Символы (слева от оси ординат):  
а – акустические волны на соответствующей дальности (0,2, 10, 90 км);  
х, у, z – компоненты сейсмического датчика на удалении 48 км.  
Время 8,27 с – вступление продольных сейсмических волн,  
время 146 с – приход акустических волн

Рисунок 3. Результаты экспериментов по выделению волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 на удалениях 0,2, 10, 48, 90 км



Рисунок 4. Вибрационный источник ЦВ-40 с амплитудой возмущающей силы 40 тс и полосой рабочих частот 6,25–11,23 Гц

В свертке в качестве опорного используется сигнал, повторяющий по форме зондирующий сигнал вибратора в диапазоне частот 6,25–9,57 Гц. На рисунке 3 представлены результаты свертки для удалений 0,2, 10, 48, 90 км. Расстояния помечены слева от рисунка. На удалениях 0,2, 10, 90 км представлены результаты выделения акустических волн. На удалении 48 км каналы трехкомпонентного сейсмического датчика х, у, z на времени 8,27 с иллюстрируют

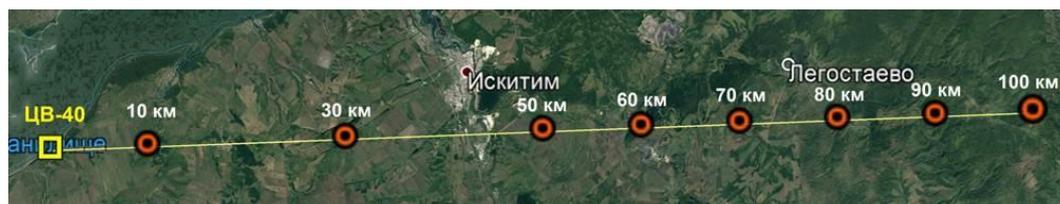


Рисунок 5. Линейный профиль регистрации сейсмических и акустических сигналов

вступления продольных сейсмических волн, а на времени 146 с – акустических волн.

По результатам экспериментов на рисунке 6 в логарифмическом масштабе приведены нормированные значения уровней акустических и сейсмических волн, а также шумов, полученные в отдельных точках регистрации.

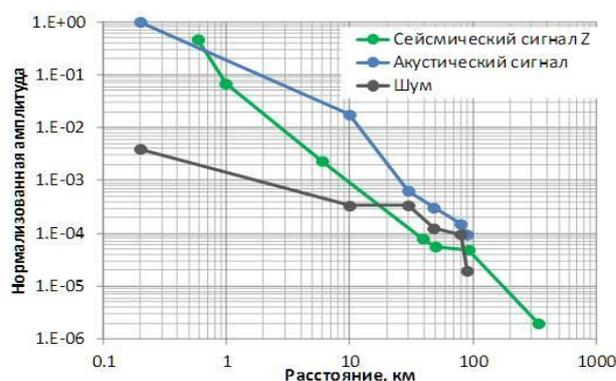
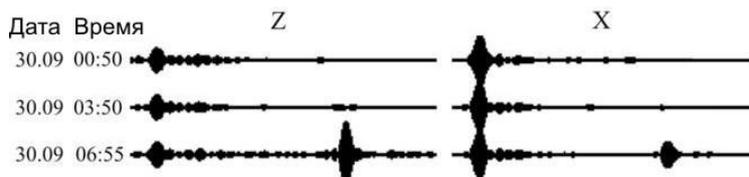


Рисунок 6. Графики затухания акустических и сейсмических волн по дальности

Графики уровней волн нормированы по отношению к уровню вблизи вибратора на удалении 200 м. Как следует из экспериментальных данных, усредненное ослабление силы звука  $I$  в пределах 100 км составляет 4 порядка, что в децибелах составит:  $D = 10 \lg 10^4 = 40$  дБ. Соответственно, относительное затухание составит 0,4 дБ/км. Принимая во внимание, что вследствие геометрического расхождения квадрату расстояния от источника, в данном случае  $\sim 100^2$  раз (40 дБ), приходим к выводу о том, что на инфранизких частотах ослабление звука с расстоянием практически полностью определяется указанным фактором. Это означает также, что фактором поглощения акустической энергии в атмосфере при этом практически можно пренебречь. Это определяет ценность применения инфранизких частот для решения ряда практических задач геофизического мониторинга, в частности, при изучении проблемы взаимодействия геофизических полей, рассматриваемой в данной работе.

Теоретический логарифмический коэффициент затухания оценивается в виде:

$$\alpha = (10 \lg I_2 - 10 \lg I_1) / (r_2 - r_1),$$



Первые вступления волн соответствуют: на 4–6 с – сейсмическим волнам, на 58–59 с – акустическим волнам

Рисунок 7. Записи сейсмических и акустических волн в ночное и утреннее время, излучаемых вибратором ГРВ-50 в диапазоне частот 3–7 Гц на удалении 20 км от источника

где  $I_1, I_2$  – интенсивности звука на расстояниях  $r_1, r_2$  соответственно. В то же время коэффициент  $\alpha$  имеет квадратичную зависимость от частоты, т. е.  $\alpha \sim f^2$ . Это означает, что при переходе с частоты зондирования атмосферы от 10 Гц до 100 Гц уровень ослабления акустической волны в одной и той же точке составит два порядка, т. е. в 100 раз. С учетом обоих рассмотренных факторов очевидно преимущество работы на инфранизких частотах для изучения взаимодействия геофизических полей на значительных (много больше длины волны) удалениях от источника.

С помощью сейсмических вибраторов – гидрорезонансного типа HRV-50 и центробежного типа CV-40 – выполнены эксперименты по регистрации феномена температурной инверсии в приземном низкотемпературном слое воздуха в утренние часы при переходе от ночи ко дню. Эксперименты выполнялись с применением излучений сейсмических и акустических колебаний в диапазоне частот 3–7 Гц и при расстоянии «источник-приемник» 20 км. Частный результат такого эксперимента представлен на рисунке 7, где приведены записи сейсмических волн (компоненты Z, X) на временах прихода волн 4–6 с и акустической волны со временем вступления ~60 с, полученные в ночные и утренние часы.

Как видно из записей, акустическая волна возникает при смене ночи и дня (в данном случае в 6 час 55 мин). Таким образом, хорошо прослеживается проявление температурной инверсии приземного слоя воздуха. Влияние влажности воздуха на уровни акустических колебаний оценивалось в серии экспериментов с вибратором ЦВ-40 на удалении 50 км. Диапазон частот зондирующих колебаний в этом

случае составил 6,25–11,23 Гц. На рисунке 8 представлено множество измеренных значений акустического давления в зависимости от влажности. Кривая максимальных значений акустического давления характеризует 2-, 3-кратное его возрастание до 95 %, После этого происходит спад, который может быть объяснен нарастающей плотностью влажного воздуха, вызывающей возрастание рассеяния и поглощения акустической энергии.

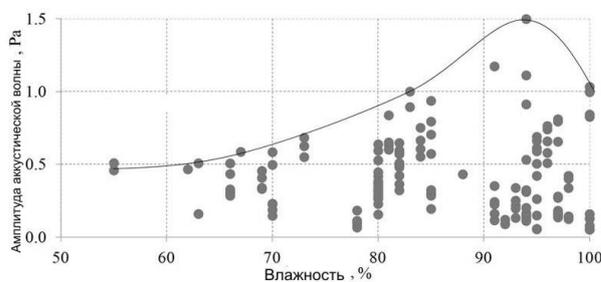


Рисунок 8. Уровни акустических колебаний вибратора СВ-40 в зависимости от влажности на удалении 50 км

Метеозависимые факторы распространения акустических волн обуславливают развитие явление пространственной фокусировки акустических колебаний в атмосфере [11–13]. Это приводит к многократно нарастающим метеозависимым геоэкологическим рискам от массовых техногенных взрывов, а также природных для окружающей среды при заданной мощности источников. Результаты таких исследований представлены в [13, 14].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 14-07-00518-а, 12-01-00773, 17-07-00872.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин, В.В. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Физика Земли, 2012. – №3. – С. 3–21.
2. Adushkin, V.V. Geoeological consequences of mass chemical explosions in quarries / V.V. Adushkin., A.A. Spivak, S.P. Solov'yov // Geoeekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya, 2000. – No. 6. – P. 554–563.
3. Khairetdinov, M.S. Detection and recognition of explosion sources / M.S. Khairetdinov, S.A. Avrorov // Vestnik NYATS RK (NNC RK Bulletin), June 2012/ - Issue 2. – P. 17–24.
4. Modern and Holocene volcanism in Russia / Ed. by Laverov N.P. – M: Nauka, 2005/ – 604 p.
5. Zaslavskii, Yu.M. Radiation of seismic waves by vibrational sources. - Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, 2007. – 200 p.
6. Alekseev, A.S. Active seismology with powerful vibrational sources / A.S.Alekseev [et al]; man. ed. G.M. Tsibulchik. – Novosibirsk: ICM&MG SB RAS, “Geo” Br. of the SB RAS Publ. House, 2004. – 387 p.
7. Алексеев, А.С. Эффект акустосейсмической индукции при вибротсейсмическом зондировании / А.С.Алексеев [и др.] // Докл. РАН.1996.

8. Глинский, Б.М. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами / Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов // Геология и геофизика, 1999,. – т.40, №3,– С. 431–441.
9. Isakovich , M.A. General Acoustics. – М.: Nauka, 1973. – 496 p.
10. Гуляев, В.Т. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмодвижителей / В.Т. Гуляев, В.В. Кузнецов, В.В. Плоткин, С.Ю. Хомутов // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана, 2001. – т.37, №3. – С. 303–312.
11. Brekhovskikh, L.M., Waves in layered media. – М.: Nauka, 1973. – 343 p.
12. Razin, A.V. On Propagation of sound in an inhomogeneous moving atmosphere / A.V. Razin // zv. Akad. nauk SSSR. Physics of Atmosphere and Ocean, 1982. - vol. 18, no. 6. – P. 674 – 676.
13. Gubarev, V. V. Prediction of Environmental Risks from Explosions Based on a Set of Coupled Geophysical Fields / V.V. Gubarev [et al] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing – 2014. – Vol. 50, No. 4. – P. 3–13.
14. Khairtdinov, M.S. Estimation of meteorological geoeological risks from explosions by means of seismic vibrators / M.S. Khairtdinov, V.V. Kovalevsky, G.M. Voskoboynikova, G.F. Sedukhina // Seismic technologies. 2016. - no. 3. – P. 132–138.

### **АТМОСФЕРА ЖҮЙЕСІНДЕ СЕЙСМОВИБРАТОРЛАРДЫҢ СЕЙСМОАКУСТИКАЛЫҚ ТОЛҚЫНДАРЫ**

<sup>1,2)</sup> Хайретдинов М.С., <sup>1)</sup> Ковалевский В.В., <sup>1,2)</sup> Воскобойникова Г.М., <sup>1)</sup> Седухина Г.Ф., <sup>1,2)</sup> Якименко А.А.

<sup>1)</sup> *Ресей ғылыми академиясы Сібір бөлімшесінің Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Новосибирск, Ресей*  
<sup>2)</sup> *Новосибирск мемлекеттік техникалық университеті, Новосибирск, Ресей*

Техногенді және табиғи жарылыстармен шартталған геоэкологиялық қауіп-қатерлерді алдын ала болжау үшін әр геофизикалық өрістердің өзара әрекеттестігін зерделеуі актуальды болып келеді. Осыған байланысты, геофизикалық өрістерді зерделеудің авторлар ұсынған вибрациялық әдісі қарастырылып, зерттеледі. Сейсмикалық вибраторлардың жоғары метрологиялық және экологиялық сипаттамалары арқасында қарастырылудағы облысында жоғары дәлдігі мен зерттеулердің қайталанушылығына, сондай-ақ оларды алу экологиялықлығына қол жеткізіледі. Зерттеулердің нәтижелері теоретикалық және экспериментальды негізделген.

### **SEISMIC-ACOUSTIC WAVES OF SEISMIC VIBRATORS IN THE LITHOSPHERE-ATMOSPHERE SYSTEM**

<sup>1,2)</sup> M.S. Khairtdinov, <sup>1)</sup> V.V. Kovalevskiy, <sup>1,2)</sup> G.M. Voskoboynikova, <sup>1)</sup> G.F. Sedukhina, <sup>1,2)</sup> A.A. Yakimenko

<sup>1)</sup> *Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics  
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*  
<sup>2)</sup> *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The problem of studying the interaction of various geophysical (seismic, acoustic, meteorological) fields is considered in the context of prediction of geo-ecological risks generated by technogenic and natural phenomena. In this connection the vibration method of studying the geophysical fields offered by the authors is considered and investigated. Thanks to high metrological and ecological characteristics of seismic vibrators high accuracy and repetition of the research results in the considered sphere are achieved as well as the ecological compatibility of their acquisition. The results of the research have been substantiated both theoretically and experimentally.