



ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

DOI: 10.18721/JPM.10201

УДК 550.34.01

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ МОРСКОГО ДНА

В.А. Чупин, Г.И. Долгих, А.Н. Самченко

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Приводится описание бесконтактного неразрушающего метода исследования структуры морского дна, использующего гидроакустическое и лазерное излучения, а также практическая реализация метода. Исследовательский комплекс включает применение новейшей низкочастотной гидроакустической излучающей системы и системы береговых лазерных деформографов, расположенных на специально выбранной морской акватории и береговой территории. Гидроакустические излучатели используются для генерации сейсмического сигнала. Регистрация сейсмических поверхностных волн осуществляется береговыми лазерными деформографами. Оптические части деформографов построены по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, где в качестве источников излучения используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры. С помощью геолого-геофизических методов была построена предварительная модель дна экспериментального полигона. На ее основе проведено исследование временных характеристик регистрируемых сейсмических волн. Доказана перспективность использованного метода исследования.

Ключевые слова: структура морского дна; лазерный деформограф; шельф; гидроакустический излучатель; сейсмический сигнал

Ссылка при цитировании: Чупин В.А., Долгих Г.И., Самченко А.Н. Неразрушающий бесконтактный метод исследования строения морского дна // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. Т. 10. № 2. С. 9–15. DOI: 10.18721/JPM.10201

A NONDESTRUCTIVE NONCONTACT METHOD OF THE SEA-BOTTOM STRUCTURE INVESTIGATION

V.A. Chupin, G.I. Dolgikh, A.N. Samchenko

V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russian Federation

The paper describes a nondestructive noncontact method of the sea-bottom structure investigation using hydroacoustic and laser radiation types. A practical implementation of this method is also presented. The research complex incorporates a state-of-the-art low-frequency hydroacoustic radiating system and a system of coastal laser strainmeters arranged in the sea-waters and the coastal-grounds of the special selection. The hydroacoustic radiators are put to generate a seismic signal. Seismic superficial waves are recorded by the coastal laser strainmeters. Optical parts of the strainmeters are constructed as the unequal-path Michelson interferometer where the frequency-stable helium-neon lasers serve as the emission sources. A preliminary

model of the sea-bottom testing ground has been developed by application of geologic-geophysical procedures. The model-based analysis of the timing data of the recorded seismic waves was carried out. The prospectivity of the used method was proved.

Key words: sea-bottom structure; laser strainmeter; shelf; hydroacoustic radiator; seismic signal

Citation: V.A. Chupin, G.I. Dolgikh, A.N. Samchenko. A nondestructive noncontact method of the sea-bottom structure investigation, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 10(2) (2017) 9–15. DOI: 10.18721/JPM.10201

Введение

В лаборатории физики геосфер Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН) в течение последних нескольких лет изучаются возможности определения структуры осадочных слоев земной коры на морском шельфе с применением береговых лазерных деформографов и их комплексов.

Лазерные деформографы могут регистрировать деформации земной коры с точностью до 10^{-10} – 10^{-12} (в зависимости от уровня частотной стабильности применяемого лазера) в широком частотном диапазоне и практически неограниченном динамическом диапазоне при измерении естественных процессов. В качестве источников сигнала для генерации сейсмоакустических волн используются гидроакустические излучатели различных модификаций.

Данные исследования развиваются в связи с возросшим в последнее время интересом к освоению природных ресурсов Мирового океана (в том числе в России) и к изучению арктического шельфа. Моря Арктики большую часть времени покрыты льдами, поэтому описанный выше бесконтактный метод исследования, который не разрушает ледовый покров, имеет большое экологическое значение.

Возможности метода регистрации поверхностных сейсмических волн, которые распространяются по границам геологических слоев земной коры, различных по акустическим свойствам, были показаны ранее [1, 2]. На основе экспериментов по регистрации береговыми лазерными деформографами сложных фазоманипулированных сигналов и по их обработке, сделаны первые шаги по определению структуры и состава земной коры.

Методика исследования

Для развития методики исследования, в июне 2016 года была выполнена комплексная экспериментальная работа по регистрации акустического сигнала лазерными деформографами при разных углах распространения сейсмических сигналов на их пути от точки трансформации до регистрирующей системы, а также при различном удалении от этой точки.

Экспериментальные исследования проводились с использованием новейшей низкочастотной гидроакустической излучающей системы и системы береговых лазерных деформографов.

Указанная система находится на морской экспериментальной станции «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН. Система включает два лазерных деформографа, имеющих длину измерительных плеч 52,5 м (NS (север-юг)) и 17,5 м (WE (запад-восток)). Они расположены на полуострове вблизи побережья, на высоте 76 м над уровнем моря. Оптические части деформографов построены по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, где в качестве источников излучения используются частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры. Чувствительные элементы инструментов и светопроводящие трубы находятся в отдельных подземных камерах, изолированных от воздействия окружающей среды. Измерительные плечи лазерных деформографов расположены почти взаимно перпендикулярно (под углом 92°). Принцип измерения каждого прибора заключается в синхронной регистрации изменений набега фаз интерферирующих лучей лазера, проходящих через измерительные плечи от центрального интерференционного узла до углового отражателя и обратно.

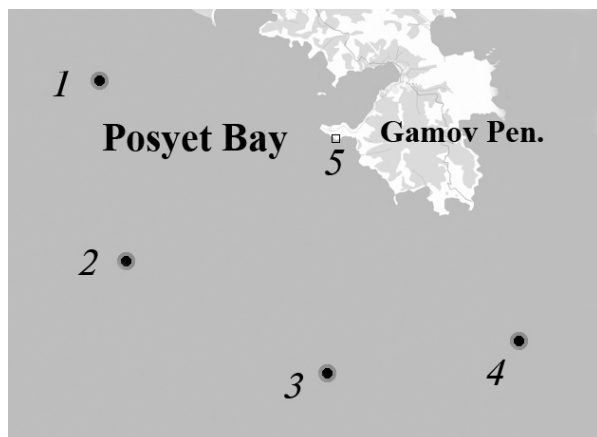


Рис. 1. Геометрическая схема эксперимента: 1 – 4 – станции излучения, 5 – местоположение приемной системы сигналов. Морская экспериментальная станция расположена в Приморском крае, в 84 км от г. Владивостока

Гидроакустическая излучающая система предназначена для генерации различных гидроакустических сигналов в полосе частот от 19 до 26 Гц, с акустической мощностью 1 кВт. В ходе проведения данного эксперимента использовалась схема работы излучателя на глубине одной четверти длины волны при частоте излучения 22 Гц. При таком режиме работы излучатель и противофазный ему мнимый источник образуют антенну; максимум характеристики ее направленности устремлен вертикально вниз, а минимум лежит в горизонтальной плоскости. В этом случае основная часть гидроакустической энергии переходит в объемные волны, а остальная часть – в поверхностные волны; именно они регистрируются лазерными деформографами. Позиционирование, а также временные характеристики гидроакустического излучения и его приема установлены с помощью системы ГЛОНАСС.

На рис. 1 показана геометрическая схема эксперимента. План проведения эксперимента заключался в излучении одинаковой серии гидроакустических сигналов от каждой станции 1 – 4; каждая расположена на расстоянии 10 км от приемной системы 5.

В пределах исследуемого полигона в заливе Посьета бурения морского дна не про-

водилось, а предварительная информация о его строении была получена из данных по геологическому опробованию дна трубками и дночерпателями, геологическому строению фундамента острова Фуругельма и мыса Гамова [3, 4] и по результатам геофизических работ [5, 6]. Дно моря на полигоне представляет собой наклоненную на юго-юго-восток слабохолмистую поверхность, осложненную неглубокими промоинами и отдельными холмами. В рельефе дна исследуемого участка были выделены осадочные волны (рифели) на профилях низкочастотного сейсмопрофилирования по данным батиметрической съемки [7].

Результаты и их обсуждение

На основании всех имеющихся данных была построена предварительная модель структуры дна на каждой из трасс распространения сигнала (рис. 2). На приведенных графиках по вертикальной оси отложена высота над уровнем моря (Above Sea Level Elevation (ASLE)), по горизонтальной – расстояние.

Согласно предварительной модели, по трассе распространения сигнала в основании находится полупространство, сложенное гранитоидами позднепермского периода IV, и осадочные слои: I – позднеплейстоцено-голоценовый период, II – нижний-средний плейстоцен, III – плиоценовый период.

Посредством спектрального анализа в записях деформографов были выделены участки записи, период которых совпадает с периодом времени работы излучателя в море. На рис. 3 приведены синхронные динамические спектрограммы записей сложного фазоманипулированного сигнала контрольным гидрофоном и береговыми лазерными деформографами при работе излучателя на станции 3 (см. рис. 1).

По результатам обработки файлов записи опорного сигнала контрольного гидрофона, полученных на каждой станции излучения, посредством математической свертки с данными лазерных деформографов, работавших непрерывно в течение всего эксперимента, было проанализировано как количество приходов сложного фа-

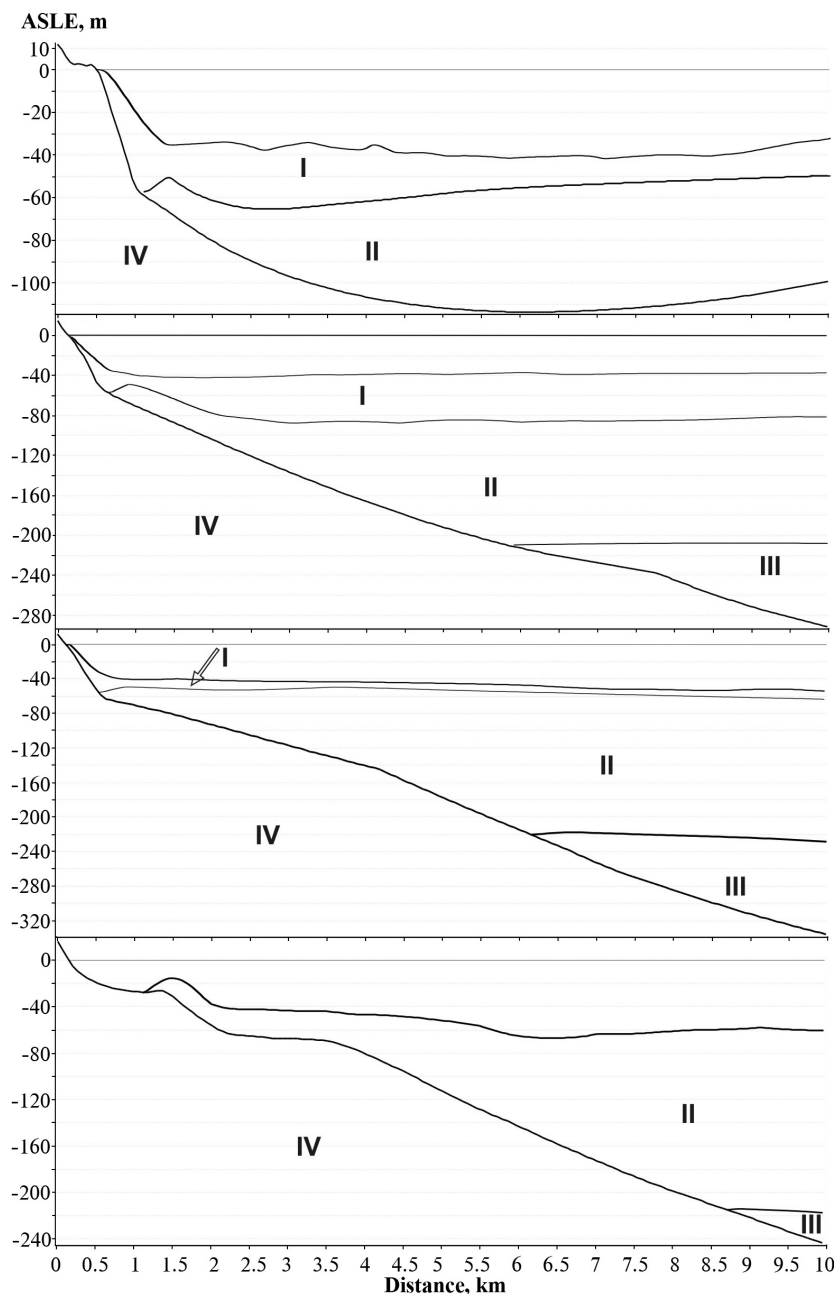


Рис. 2. Вертикальные разрезы верхнего слоя земной коры по линиям, соответствующим трассам от станций 1 – 4 (графики сверху вниз) до деформографов 5 (см. рис. 1); отложены зависимости высоты над уровнем моря (ASLE) от расстояния; I – IV – геологические периоды (указаны в тексте)

зоманипулированного сигнала, так и момент времени каждого прихода. На рис. 4 приведены графики результатов математической свертки контрольного сигнала и сигналов, принимаемых обоими лазерными деформографами. Эти результаты получе-

ны нами для всех станций излучения в ходе проведенного эксперимента.

По результатам математической обработки экспериментальных данных были проанализированы моменты времени прихода каждого максимума сигнала, распро-

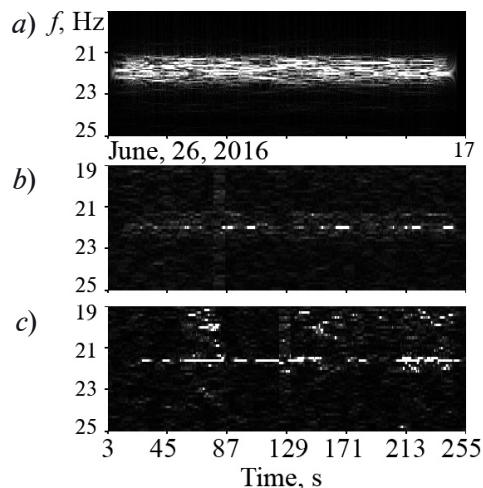


Рис. 3. Динамические спектрограммы записей контрольного гидрофона (a), а также лазерных деформографов WE (b) и NS (c); работал гидроизлучатель на станции 3 (см. рис. 1) 26 июня 2016 года, с 7 ч 59 м до 8 ч 03 м по местному времени

страняющегося от станции излучения, до системы береговых лазерных деформографов. Этот анализ показал, что количество приходов фазоманипулированного сигнала

с разных станций было от трех до восьми, в соответствии со строением дна по каждой трассе излучения. Данные, полученные от каждого лазерного деформографа, дополняют общий результат.

Моменты первого прихода сигнала с каждой станции излучения, полученные с начала регистрации, – различны. Например, период времени первого прихода со станции 1 был 3,3 с, со станции 2 – 3,0 с, со станции 3 – 3,3 с, со станции 4 – 2,8 с. Разница этих периодов времени для первых приходов достигала 0,5 с. В соответствии с предварительными моделями структуры дна, глубина моря на станции 1 должна быть 30 м, а граница полупространства, сложенного гранитоидами, – 100 м. Соответствующие данные на станции 4 должны составлять 60 и 240 м.

Заключение

Полученные при измерениях результаты привели к заключению, что предварительная структурная модель нуждается во внесении поправок. Если в дополнение к проведенным измерениям регистрировать

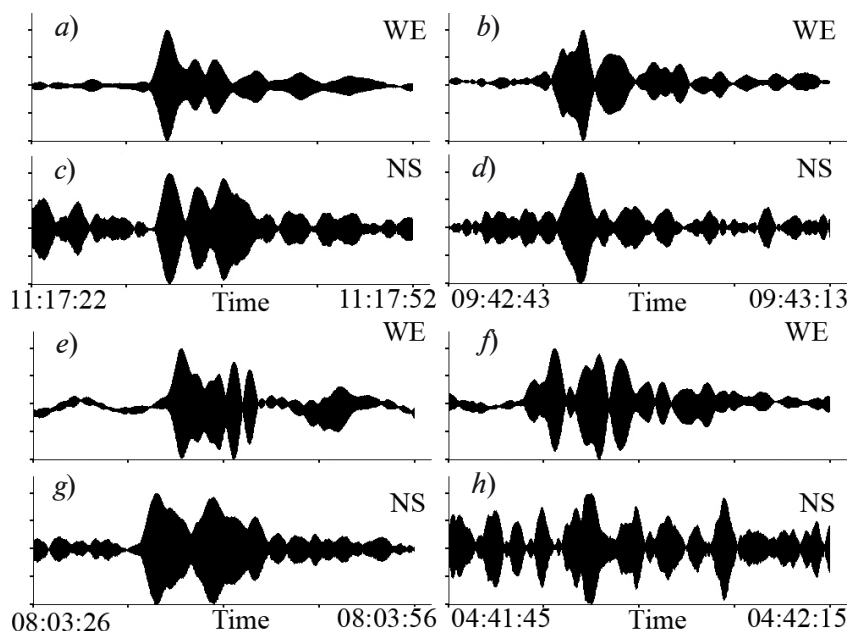


Рис. 4. Результаты математической свертки сигнала от контрольного гидрофона и данных лазерного деформографа; использованы деформографы WE (a,b,e,f) и NS (c,d,g,h); контрольные гидрофоны и гидроакустические излучатели располагались на станциях 1 (a, c), 2 (b, d), 3 (e, g), 4 (f, h) (см. рис. 1); WE, NS – 17,5-метровый и 52,5-метровый деформографы, соответственно

температуру толщи воды, то могут возникнуть разные варианты скорости распространения акустического сигнала в верхних слоях дна. Это и исходная скорость распространения сигнала в водном слое, и скорости пересечения осадочных слоев и распространения сигнала по границам осадочных слоев, а также по полупространству. При подборе известных скоростей распространения звука по рыхлым осадкам и скальным породам, сейсмических волн продольных, затухающих и незатухающих волн Рэлея, волн Стоунли можно сделать выводы о строении дна в исследуемой области. Такие исследования позволят внести дополнения в уже существующие модели строения земной коры.

При использовании же мобильных лазерных деформографов можно получать без создания стационарных береговых станций новые данные о строении верхнего слоя земной коры в неисследованных областях российского шельфа.

Благодарности

В заключение авторы выражают благодарность научному сотруднику А.А. Пивоварову и старшему научному сотруднику А.Н. Швыреву за обеспечение работы гидроакустического излучателя.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 14-17-00041, обработка данных) и программы ДВО РАН «Дальний Восток».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырёв А.Н., Ярошук И.О. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // ДАН. 2013. Т. 452. № 3. С. 321–325.
2. Чупин В.А., Долгих Г.И. Развитие технологии диагностики морского дна с помощью низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых лазерных деформографов // Вестник ДВО РАН. 2015. Т. 6. № 184. С. 90–95.
3. Васильев Б.И., Марков Ю.Д., Царько Е.И., Демидова Т.И. О геологическом строении континентального склона залива Петра Великого (Японское море) // Вопросы геологии дна Японского моря. Владивосток: Издание Дальневосточного научного центра. Тихоокеанское отд. Института океанологии, 1973. С. 49–57.

4. Свининников А.И., Ярошук И.О. Геоакустическая модель шельфа Японского моря (на примере залива Посыета) // Вестник ДВО РАН. 2006. № 3. С. 85–93.
5. Марков Ю.Д. Южноприморский шельф Японского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Владивосток: Издание Дальневосточного научного центра АН СССР, 1983. 128 с.
6. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посыета (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 1. С. 65–75.
7. Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Пространственно-временной анализ геоморфологии океанического дна залива Петра Великого Японского моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 538–545.

Статья поступила в редакцию 01.12.2016, принята к публикации 02.02.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧУПИН Владимир Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
chupin@poi.dvo.ru

ДОЛГИХ Григорий Иванович — доктор физико-математических наук, академик РАН, зав. отделом Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Российская Федерация.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
dolgikh@poi.dvo.ru

САМЧЕНКО Александр Николаевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
samchenko@poi.dvo.ru

REFERENCES

- [1] **G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, A.A. Pivovarov, et al.**, The feasibility of laser strainmeters for sea floor diagnostics, *Doklady Earth Sciences*. 452 (1) (2013) 971–975.
- [2] **V.A. Chupin, G.I. Dolgikh**, Technology development of sea-bottom diagnostics by means of low-frequency hydroacoustic radiators and coastal laser strainmeters, *Bulletin of the East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2015. 6 (184) (2015) 90–95.
- [3] **B.I. Vasilyev, Yu.D. Markov, E.I. Tsarko, T.I. Demidova**, О геологическом строении континентального склона залива Петра Великого (Японское море) [On geological structure of the continental slope of Peter the Great Bay (the Sea of Japan)], In: *On the bed geology of The Sea of Japan*, Vladivostok. (1973) 49–57.
- [4] **A.I. Svinnikov, I.O. Yaroshchuk**, Geoacoustic modeling of the Sea of Japan shelf (for Possyet Bay taken as an example), *Bulletin of the East Branch of the Russian Academy of Sciences*. (3) (2006) 85–93.
- [5] **Yu.D. Markov**, Yuzhnoprиморский shelf Yaponskogo моря v pozdnem Pleystotsene i Golotsene [South-seaboard shelf of the Sea of Japan in the Later Pleistocene and Holocene], Vladivostok: DVNTs AN SSSR (1983).
- [6] **A.N. Samchenko, V.N. Karnaukh, K.I. Aksentov**, Geological geophysical studies of the upper sedimentary cover and geo-acoustic model for the Posiet Bay shelf (the Sea of Japan), *Russian Journal of Pacific Geology*. 32 (1) (2013) 65–75.
- [7] **R.A. Korotchenko, A.N. Samchenko, I.O. Yaroshchuk**, The spatiotemporal analysis of the bottom geomorphology in Peter the Great Bay of the Sea of Japan, *Oceanology*. 54 (4) (2014) 497–504.

Received 01.12.2016, accepted 05.02.2017.

THE AUTHORS

CHUPIN Vladimir A.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 69004, Russian Federation
chupin@poi.dvo.ru

DOLGIKH Grigoriy I.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 69004, Russian Federation
dolgikh@poi.dvo.ru

SAMCHENKO Aleksander N.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 69004, Russian Federation
samchenko@poi.dvo.ru