

УДК 612.16+534.87

© В. И. Коренбаум^{1,2}, С. В. Горовой^{1,2}, А. Е. Бородин³, А. А. Тагильцев¹, А. Е. Костив¹, А. Д. Ширяев¹,
А. М. Василистов¹, И. А. Почекутова¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

³Дальневосточное отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Владивосток

v-kor@poi.dvo.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ШУМОВ ЛЕГКОВОДОЛАЗОВ

Исследуется возможность применения шумов дыхания легководолазов для их контроля. В мелководной бухте размещенными на дне гидрофонами зарегистрированы всплески гидроакустического шума, соответствующие вдохам и выдохам легководолаза, совершающего под водой различные маневры. Проведен спектральный анализ записи шумов легководолаза с аквалангом, удаляющегося от гидрофонов. Зарегистрированы сигналы с гидрофонов, когда легководолаз с дыхательным аппаратом замкнутого цикла (ребризером) подплывает и ложится на один из них, а затем уплывает. Квазипериодические составляющие дыхательных шумов легководолаза можно использовать для оценки таких его физиологических параметров как средняя частота дыхания и вариабельность частоты дыхания, а также принятия решения о необходимости прекращения погружения.

Ключевые слова: шумы легководолазов, шумы дыхания, частота дыхания, энергетический приемник.

V. I. Korenbaum^{1,2}, S. V. Gorovoy^{1,2}, A. E. Borodin³, A. A. Tagiltcev¹, A. E. Kostiv¹, A. D. Shiryayev¹, A. M. Vasilistov¹,
I. A. Pochekutova¹

¹V. I. Il'ichev Pacific Oceanologic Institute of RAS, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

³Section of Applied Problems at Presidium of RAS, Vladivostok, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF POSSIBILITY OF DIVERS' RESPIRATORY NOISES DETECTION

The possibility of divers' control by their respiratory noises is studied. The experimental studies were conducted in a shallow water bay. Hydroacoustic noise bursts corresponding to an underwater maneuvering diver inhales and exhales are registered by bottom installed hydrophones. The spectrum analysis of noise record of an aqualung equipped diver moving away from the hydrophones with the average speed of 0.5 m/s showed maximum amplitudes around 0.36 Hz and 0.54 Hz that can be considered as a spectral maximum bifurcation and correspond to a breathing rate. Signals from the hydrophones when a diver equipped with closed-circuit breathing apparatus (rebreather) swims up and lies on one of the hydrophones and then flow away were registered. Quasi-periodic components of diver's respiratory noises can be used for evaluation of his physiological parameters such as breath average frequency and breathing rate variability as well as for taking a decision on the necessity of ending a dive.

Key words: respiratory noises, energy receiver, divers, monitoring.

Проблема контроля состояния здоровья и местоположения легководолазов при учебных и рабочих погружениях остается актуальной во многих практических приложениях. Для этого в основном применяются методы активной акустической локации [1]. Тем не менее, по многим практическим критериям особое значение имеют пассивные акустические методы [2, 3]. Цель данной работы — на основе экспериментальных данных оценить возможность обнаружения шумов дыхания легководолаза. Для этого в условиях мелководной акватории бух. Патрокл залива Петра Великого Японского моря был проведен ряд натурных экспериментов. Глубина места в районе работ составляла 4 м, грунт — песок. Во время проведения экспериментов наблюдались гидроакустические помехи со сплошным спектром и дискретными составляющими от стоящих на якорях и проходящих на удалении 2 мили и более судов, а также интенсивные импульсные помехи в виде щелчков, создаваемые морскими ракообразными.

Приемная система состояла из 9 лежащих на дне вдоль прямой линии ненаправленных гидрофонов, расстояния между которыми составляли 1 м, и расположенной на берегу регистрирующей

аппаратуры. Сигналы с выходов гидрофонных усилителей (коэффициент усиления 100, входное сопротивление 5 МОм, полоса частот 20—2000 Гц) были дискретизированы 16-разрядным АЦП с частотой дискретизации 10 кГц на 16-канальном самописце PoweLab (ADInstruments). Дополнительно сигналы двух каналов были дискретизированы с помощью звуковой карты E-MU 0404USB 2.0 Creative Labs. Записи дискретизированных сигналов обработаны с помощью программно реализованного многоканального энергетического приемника (фильтр-детектор-интегратор) с перестраиваемыми характеристиками: отфильтрованы в заданной полосе частот, а затем выполнено квадратичное детектирование и накопление. Водолазы были экипированы в «мокрые» гидрокостюмы и использовали дыхательные аппараты различных типов.

В ходе одного из экспериментов была выполнена запись шумов легководолаза с аквалангом АВМ-5, удаляющегося от лежащих на дне гидрофонов на дистанцию до 100 м со средней скоростью 0.5 м/с (рис. 1). Момент времени 30 с соответствует началу удаления легководолаза от гидрофона. Момент времени 150 с оценочно соответствует удалению от гидрофона на 70 м.

На рис. 2 приведен график оценки усредненной спектральной плотности мощности огибающей шумов для интервала 30—130 с (рис. 1), разрешение по частоте 0.0224 Гц. Усреднено 17 спектров, сдвинутых последовательно на 512 выборок. На рис. 2 заметны два спектральных максимума, соответствующие частотам 0.36 и 0.54 Гц. Их можно рассматривать как раздвоение единого спектрального максимума, соответствующего частоте дыхания. Это раздвоение предположительно связано с изменением частоты дыхания водолаза вследствие физической нагрузки, вызванной его движением на ластах. Регистрируемые при этом сигналы, судя по воспринимавшимся на слух звукам, соответствуют выдохам водолаза-аквалангиста и вероятно связаны с выбросом аквалангом пузырьков выдыхаемого воздуха.

В другом эксперименте получена запись шумов легководолаза, оснащенного дыхательным аппаратом замкнутого цикла F.R.O.G.S. (Aqua Lung). Была выполнена запись воспринимаемых гидрофонами сигналов, когда водолаз подплывает к одному из них, ложится на него грудью, касаясь гидрокостюмом, лежит по возможности неподвижно в течение одной минуты, а затем уплывает. На рис. 3, б показана осциллограмма сигнала с гидрофона, на котором грудью лежал водолаз, на рис. 3, а показана осциллограмма сигнала с гидрофона, отстоящего от данного гидрофона на 3 м. Обработка трактом энергетического приемника (рис. 4) позволяет визуально выделить квазипериодические пики шумов, соответствующие дыхательному ритму.

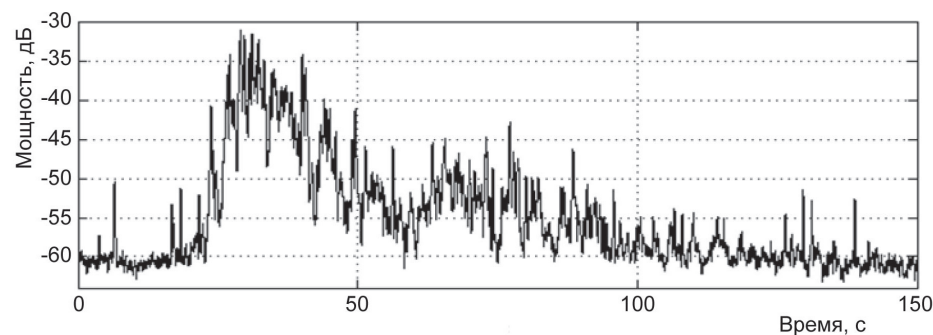


Рис. 1. Осциллограмма шумов водолаза-аквалангиста на выходе энергетического приемника в процессе его удаления от гидрофона, полоса частот 200—500 Гц, время накопления 0.25 с.

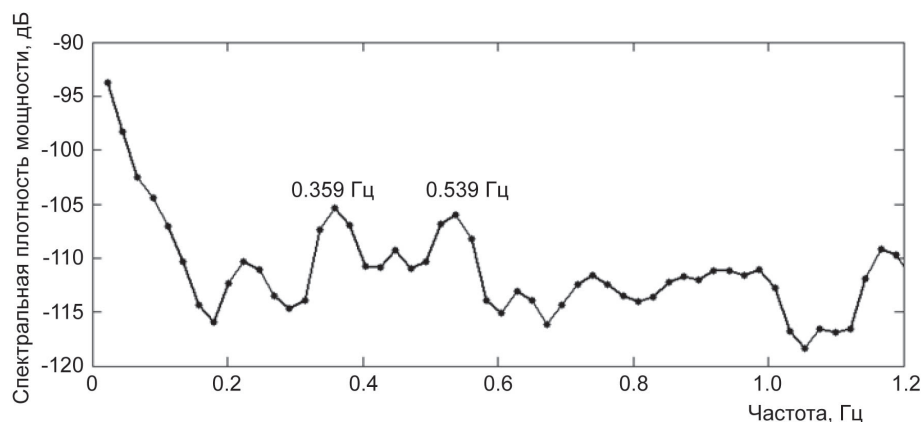
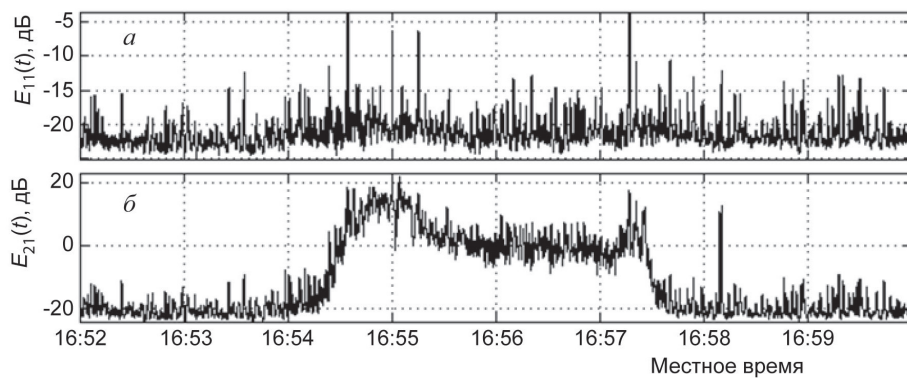
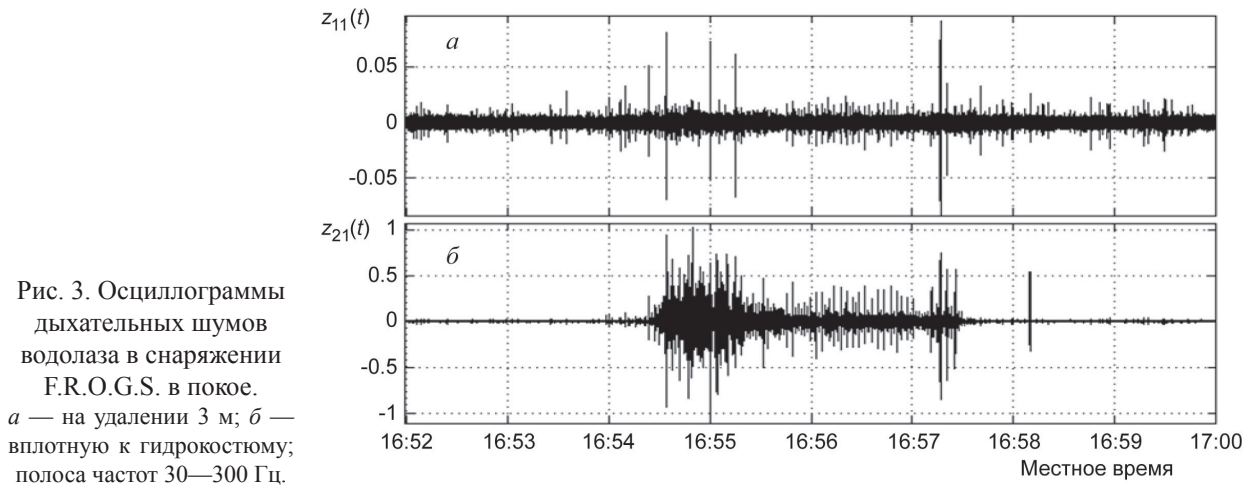
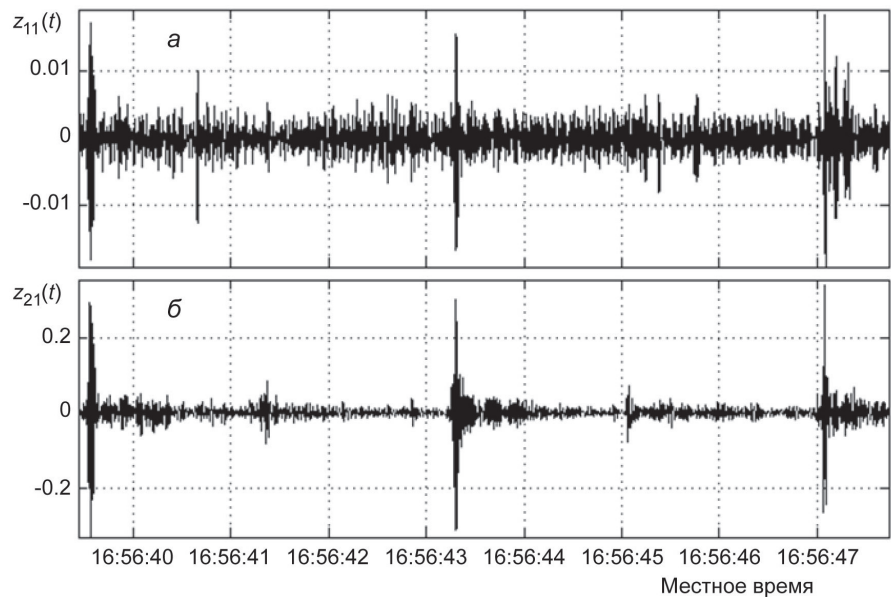


Рис. 2. Спектральная плотность мощности огибающей шумов водолаза-аквалангиста (рис. 1) на интервале времени 30—130 с (масштаб по оси ординат условный).



Чтобы ответить на вопрос о происхождении регистрируемых шумов рассмотрим рис. 5, на котором изображены растянутые фрагменты записи с гидрофонов (рис. 3). Он содержит 3 мощных периодически расположенных всплеска шумов, ассоциируемых с вдохом водолаза, и 2 более слабых пика, связываемых с выдохом. Эти всплески различимы как непосредственно у гидрокостюма водолаза (рис. 5, *б*), так и на удалении 3 м (рис. 5, *а*).



После пиков шумов вдоха на рис. 5 заметна серия колебательных всплесков шума. Последние позволяют связать основной источник этих всплесков шумов с колебаниями резиновой мембраны дыхательной камеры аппарата F.R.O.G.S., слабые хлопки которой о стенки камеры прослушиваются вблизи от аппарата и при его нахождении в воздушной среде.

Спектральное преобразование огибающей на интервале времени 16:54:30—16:57:30 (рис. 6) позволяет зарегистрировать спектральные пики близки 0.3 Гц на гидрофонах антенной системы. При этом на большинстве гидрофонов заметны также пики удвоенной частоты, характеризующие дыхательный цикл (вдох-выдох) в целом.

Водолазом в снаряжении F.R.O.G.S. был совершен проход над гидрофонами при движении на ластах (рис. 7). Водолаз сначала приближался к гидрофонам, а затем удалялся от них со средней скоростью 0.5 м/с. Для участка огибающей (рис. 7, а) на интервале местного времени 16:39:30—16:40:30 выполнено спектральное преобразование (БПФ 32768 отсчетов, перекрытие 50 %, разрешение по частоте 0.0122 Гц), результаты которого приведены на рис. 8 (линия 1) в сравнении с спектром шумового фона (линия 2). Из анализа рис. 8 следует, что характерные для дыхания водолаза (рис. 7) спектральные максимумы с частотами вблизи 0.3—0.4 Гц и их гармоники наблюдаются с превышением над фоном 5—10 дБ.

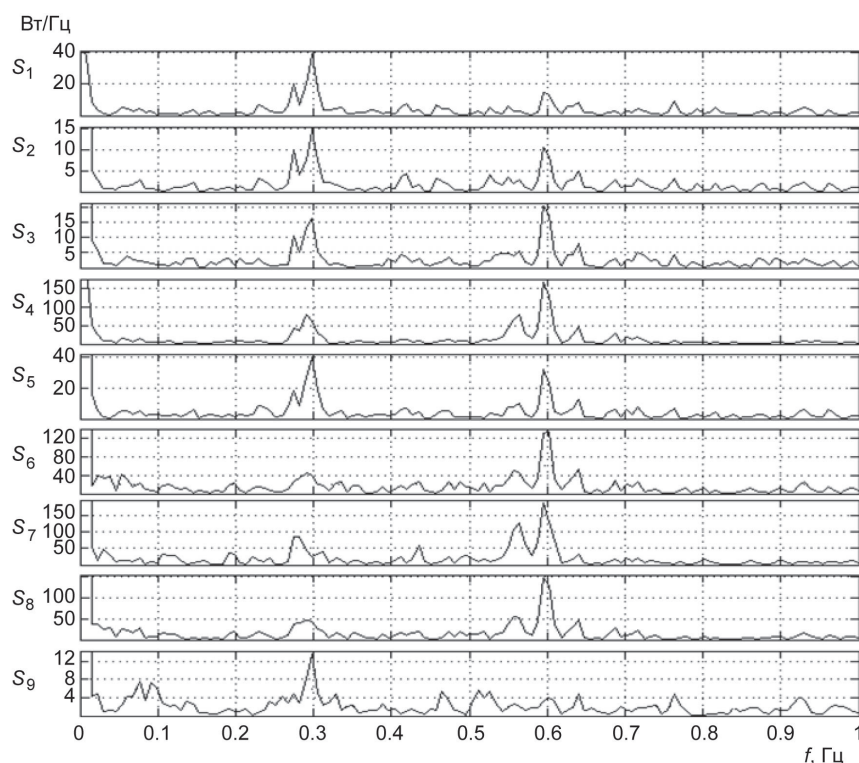


Рис. 6. Спектральная плотность мощности огибающих сигналов на выходах 9 гидрофонов (масштаб по оси ординат условный).

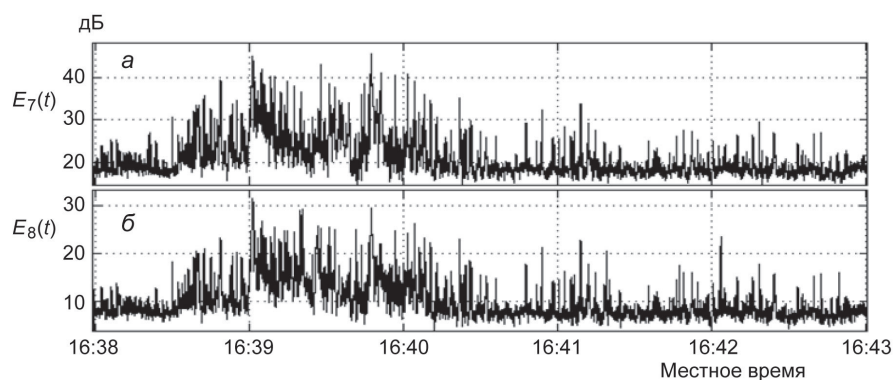
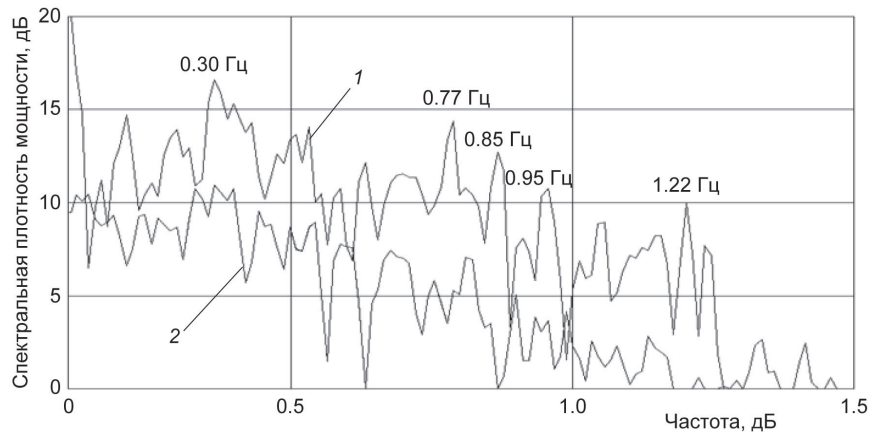


Рис. 7. Осциллограммы шумов водолаза, экипированного дыхательным аппаратом замкнутого цикла F.R.O.G.S., на выходах энергетических приемников, подключенных к двум гидрофонам при проходе водолаза на ластах, полоса частот 30—300 Гц, время накопления 0.2 с.

Рис. 8. Спектральная плотность мощности огибающей с выхода гидрофона.

1 — в процессе прохода водолаза на ластах над ним (рис. 7), 2 — фон (масштаб по оси ординат условный).



Таким образом, низкочастотные модуляции шумов, связанные с дыхательным ритмом водолаза, могут быть обнаружены не только при использовании им акваланга, но и менее шумного дыхательного аппарата замкнутого цикла — ребризера F.R.O.G.S. Выделенные тем или иным способом квазипериодические составляющие дыхательных шумов легководолаза можно использовать для оценки таких физиологических параметров как средняя частота дыхания, вариабельность частоты дыхания и, возможно, соотношение продолжительностей фаз вдоха и выдоха.

Эти физиологические параметры в известной мере характеризуют не только вентиляционную функцию легких, но и общее состояние водолаза. Действительно, известно, что частота дыхания при отравлении кислородом (гипероксии) снижается, тогда как при отравлении углекислым газом и чрезмерных физических нагрузках — увеличивается [4]. Удлинение фазы выдоха по отношению к фазе вдоха является известным признаком бронхиальной обструкции, которая, в частности, может возникать и при гипербарической гипероксии у водолазов [5]. Изменение вариабельности частоты дыхания характеризует процессы регуляции дыхательной активности и может быть ранним признаком нарушений в этой части [6]. Таким образом, оценка указанных параметров и сравнение с нормами, в том числе и предварительно определяемыми индивидуально для каждого из легководолазов, может быть использована для контроля их состояния и принятия решения о необходимости прекращения погружения.

С другой стороны, квазипериодические характеристики шумов, связанные с дыханием водолаза целесообразно использовать для определения задержек времени прихода на несколько разнесенных гидрофонов методами корреляционного анализа как исходных сигналов, так и их огибающих. В результате, с применением методов триангуляции становится возможной оценка местоположения водолаза под водой. Для повышения помехоустойчивости вместо одиночных гидрофонов можно по аналогии с [3] использовать антенные решетки с целью дополнительной пространственной фильтрации. Знание с той или иной точностью местоположения водолаза в пределах акватории важно как для контроля выполняемой им работы, так и обеспечения его безопасности.

Поскольку низкочастотные дыхательные шумы являются неустранимой частью шумоизлучения легководолазов, выделение вышеописанных квазипериодических модуляций в общем фоне шумов моря может оказаться полезным и для наблюдения за акваториями в антитеррористических целях.

Литература

1. Викторов Р. В., Колмогоров В. С., Кречетов Д. Г., Плюхин В. В., Черкашин Ю. В. Адаптивная фильтрация сигнала при регистрации прохода подводного пловца // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 44—49.
2. Stolkin R., Sutin A., Radhakrishnan S., Bruno M., Fullerton B., Ekimov A., Raftery M. Feature based passive detection of underwater threats // Proc. SPIE. 2006. 6204. 40—49.
3. Fillinger L., Hunter A. J., Zampolli M., Clarijs M. C. Passive acoustic detection of closed-circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 132, № 4. P. EL310—EL316.
4. Смолин В. В., Соколов Г. М., Павлов Б. Н. Водолазные спуски и их медицинское обеспечение. М.: Слово, 2001. С. 377—380.
5. Почекутова И. А., Коренбаум В. И. Акустическая оценка влияния одиночного погружения в водолазном снаряжении закрытого типа на вентиляционную функцию легких // Физиология человека. 2011. Т. 37, № 3. С. 76—82.
6. Гришин О. В., Гришин В. Г., Коваленко Ю. В. Вариабельность легочного газообмена и дыхательного ритма // Физиология человека. 2012. Т. 38, № 2. С. 87—93.

Статья поступила в редакцию 21.05.2015 г.