MAX IAR

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ, ПРОЧНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ ИСКУССТВЕННЫМ ХОЛОДОМ

Материалы IX научно-технической конференции

300- летию Санкт-Петербурга посвящается

Санкт – Петербург
2003

УДК 551.340

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МЕЖСКВАЖИННОЙ РАДИОВОЛНОВОЙ ГЕОИНТРОСКОПИИ ПРИ КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЧНО МЕРЗЛЫХ МАССИВОВ.

В.А. Истратов, А.О. Кучмин (ООО «Радионда», Москва),
А.Д. Фролов (Научный совет по криологии Земли РАН, Москва)

Введение. Наблюдения (мониторинг) в реальном масштабе времени за изменением физических свойств мерзлых пород является неотъемлемой частью работ, которые необходимо проводить при строительстве, и эксплуатации промышленных, горно-технических, гидротехнических, гражданских и других объектов, построенных в условиях «вечной мерзлоты или с применением искусственного замораживания окружающих грунтов. В первом случае мониторинг необходим для выявления и контроля техногенного воздействия сооружений на природно-мерзлый массив, а во втором - для контроля за формированием и состоянием замороженного массива.

В мерзлом состоянии грунты различного литологического состава обладают достаточно высокими удельными электрическими сопротивлениями ρ. Процесс оттаивания сопровождается их значительным понижением. Кроме того, высокая водонасыщенность в проницаемых пластах или локальных геологических неоднородностях должна отражаться повышением их относительной диэлектрической проницаемости ε. Информативность электрических свойств промерзающих и оттаивающих пород [2] определяет целесообразность применения электромагнитных методов при решении инженерно-геологических и геокриологических задач. Для определения электрических свойств мерзлых пород (эффективных значений ρ и ε) в условиях их естественного залегания, а также для контроля изменения этих свойств во времени и пространстве, большими возможностями обладает технология радиоволновой геоинтроскопии межскважинного и околоскважинного пространства - РВГИ с различными вариантами методики выполнения измерений[1,3,4].

Основы технологии РВГИ.

Физико-геологической основой РВГИ является зависимость интенсивности поглощения энергии радиоволн от электрических характеристик пород, расположенных на трассе распространения волны. Анализ волновой картины, получаемой путем многократного и под разными углами «просвечивания» изучаемого массива высокочастотным электромагнитным полем гармонического дипольного источника, позволяет достаточно детально исследовать межскважинное пространство, определить электрические свойства грунтов в естественном залегании и их распределение в пространстве, выявить и локализовать неоднородности строения мерзлого массива, его размеры и т.п.. Диапазон радиочастот 0.06 –31 МГц, реализованный в аппаратуре РВГИ-2 (рис.1), позволяет подбором оптимальной рабочей частоты и специальной регулировкой (подстройкой)

излучения обеспечивать необходимые условия измерений (среда - квазипроводник или квазидиэлектрик) для надежной оценки эффективных значений электрических свойств, т.е. $\rho_{эф}$ и $\varepsilon_{эф}$.

Существенными особенностями технологии РВГИ являются:
- возможность выбора оптимальных рабочих частот и измеряемых компонент электромагнитного поля, обеспечивающая наилучшую разрешающую способность при требуемой эффективной дальности;
- применение гармонических сигналов, определяющее высокую помехозащищенность;
- использование относительно коротких приемных и излучающих диполей, позволяющее проводить измерения в ограниченных по длине интервалах скважин;
- возможность проведения измерений непосредственно в интересующем (рабочем) горизонте, что снижает влияние перекрывающих и подстилающих пород.

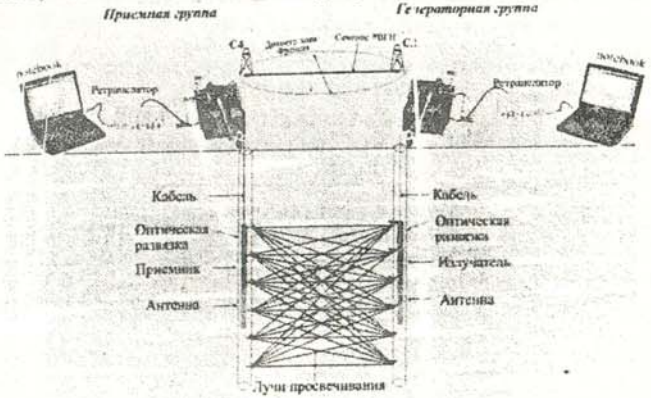
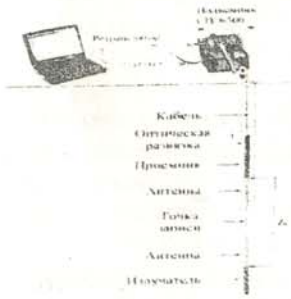


Рис.1а. Схема измерительной установки и система наблюдений методом РВГИ.

Измерения напряженности поля при межскважинных исследованиях выполняются обычно веерным способом, т.е. с каждой стоянки передатчика в одной скважине проводятся измерения поля по всему рабочему интервалу глубин в другой (или других) скважине (рис.1а). Шаг измерений при точечной записи составляет ~ 0.5 м, а при непрерывной записи ~ 0.1м.



При поиске распределения поглощающих свойств в межскважинном пространстве, применяются как 2-х, так и 3-х мерные методы решения обратной задачи.

В дополнение к межскважинному радиоволновому просвечиванию возможно проведение

Рис.1б. Схема измерительной установки ОРВП.

измерений вариантом односкважинного радиоволнового профилирования на разных частотах - ОРВП (Рис.1б). Выполнив 2-х частотные измерения вдоль профиля скважин, по данным на низкой частоте (≤ 1 МГц) можно получить картину изменения $\rho_{эф}$ пород в пространстве и во времени, которая будет отражать развитие процесса оттаивания мерзлого или промерзание талого массива.. Обработка данных измерений на высокой частоте (31 МГц) позволяет вычислить $\varepsilon_{эф}$ и по интервалам высоких её значений выделить и детально локализовать участки наибольшего водонасыщения (фильтрации), «окна» не промороженного грунта и т.п..

Некоторые результаты применения и их обсуждение

В качестве примера применения технологии ОРВП-РВГИ рассмотрим результаты исследований частично подтаявшего берегового мерзлого массива вдоль профиля скважин, ориентированного перпендикулярно береговой линии водохранилища (Рис.2) Сытыканского гидроузла в Западной Якутии.

На рис.3 приведены геоэлектрические разрезы, построенные методом линейной интерполяции с едиными коэффициентами анизотропии по данным ОРВП, полученным в марте, августе 2001 года и июне 2002 года. Как видно из разрезов, даже на фоне сильной электрической контрастности, связанной с переменной литологией, характерной для пород в данном разрезе, наблюдается ясно выраженная общая закономерность изменения значений удельного электрического сопротивления как во времени, так и в пространстве. По мере удаления от береговой линии эффективное ρ пород всех литологических разностей

Рис.2. Рекомендуемая сеть наблюдательных скважин для контроля за фильтрацией в правом борту Сытыканского гидроузла (Саха-Якутия).

в разной степени, но постепенно повышается в направлении скважины №10. Сравнивая результаты, полученные в марте и августе, можно увидеть не только общее продвижение «фронта пониженных удельных электрических сопротивлений» в том же направлении, но и выделить горизонты 309-311 м и 314-317 м и 321 – 324 м, по которым эти изменения происходят наиболее интенсивно. В августе в пределах этих пластов наблюдается достаточно резкое понижение сопротивления в скв. №10. Именно на тех глубинах в данной скважине в августе отмечены первые положительные значения температуры. В целом, выявленная закономерность изменения удельного электрического сопротивления является прямым отражением процесса оттаивания мерзлых пород.

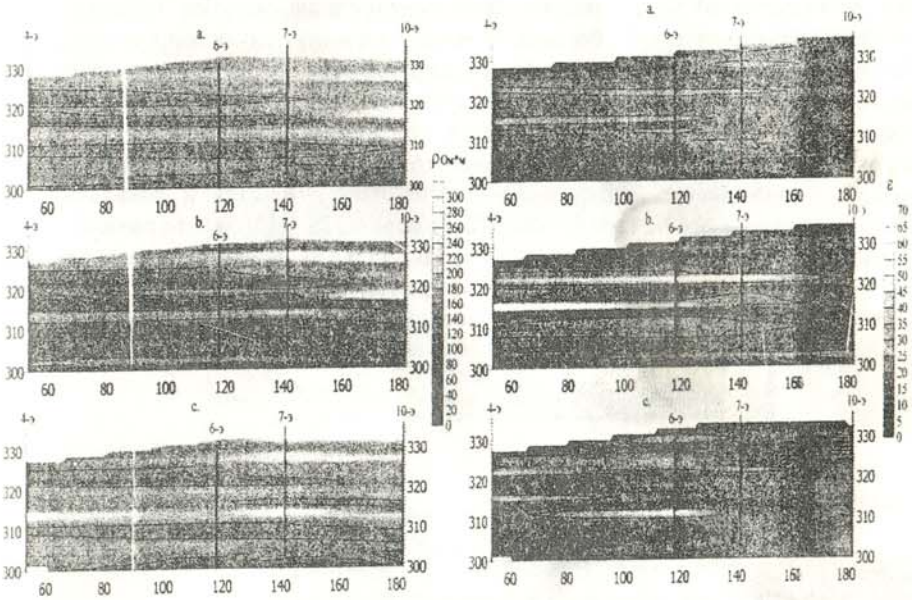


Рис.3. Разрезы эфективных значений электросопротивления (ρ) и относительной диэлектрической проницаемости (ε) вдоль профиля скважин 4-6-7-10 в марте 2001 (a.), августе 2001 (b.) и июне 2002 (c.) Сытыканского гидроузла.

Однако, в июне 2002 года, как видно на рисунке, сопротивление пород в разрезе в целом повышается, что связано с максимальной проморозкой пород, и минимальной температурой воды в Сытыканском водохранилище. Наглядно это прослеживается в пласте 314 – 317 м, в котором наблюдается относительное повышение сопротивления между 4-й и 6-й скважинами.

Сравнивая соответствующие геоэлектрические и температурные разрезы марта и августа 2001г., можно увидеть, что нулевая изотерма проходит по подошве пласта высокого сопротивления 324-326 м, а высокий градиент изменения сопротивления отмечает здесь границу мерзлых и талых пород. Если в марте в скв. №7 на интервале 290-317 м впервые были отмечены положительные температуры в доли градуса, то на геоэлектрическом разрезе достаточно резкое

понижение сопротивления на горизонтах 309-312 м и 317-319 м уже явно прослеживалось в направлении к скв.10, что свидетельствует о высокой чувствительности электрических свойств мерзлых пород к изменениям их состояния.

На геоэлектрическом разрезе эффективных значений диэлектрической проницаемости пласты с наиболее высокими значениями $\varepsilon_{эф}$ (интервалы 311-31-м и 317-319м) соответствуют участкам высокого градиента положительных температур в августе 2001г. Локальный участок повышенных значений $\varepsilon_{эф}$ вблизи скважины №6 в интервале 306-309 м также совпадает с локальной аномалией положительных температур. Совокупность полученных данных позволяет заключить, что выделенные пласты с высокими значениями $\varepsilon_{эф}$ являются горизонтами наиболее интенсивной фильтрации. В летний период положительных температур воды Сытыканского водохранилища по этим проницаемым пластам проникают вглубь берегового массива и в последующем являются как бы «вторичными источниками тепла», распространяя и ускоряя процесс оттаивания мерзлых пород всего массива. Весной 2002 года и в июне при минимальной температурой всего массива пород и при минимальной температуре воды водохранилища (до «вскрытия») на разрезе диэлектрической проницаемости области с аномально повышенными значениями сужаются и локализуются вблизи скважины №6 на горизонтах 310 – 312 м и 322 – 325 м, что связано с резонным промерзанием геологической среды. Однако, присутствие локальных зон с повышенными значениями диэлектрической проницаемости позволяет предполагать существование зон «круглогодичной» обходной фильтрации.

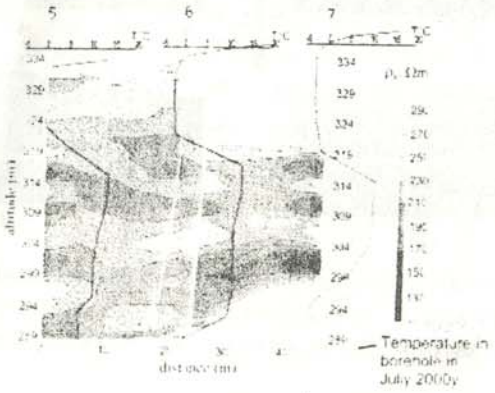


Рис.4. Результаты межскважинного радиоволнового просвечивания в июле 2000 года, с температурными кривыми по скважинам в тот же период.

Корреляция изменения электрических свойств с температурой представлена на рис.4, где по данным межскважинного просвечивания в июле 2000 г. четко фиксируется граница мерзлых и талых пород. По результатам межскважинного радиопросвечивания выделяются те же закономерности строения разреза, но при этом удается более детально проследить изменение электрических свойств в пространстве между скважинами, выделить участки локальных неоднородностей и связь между ними. Это особенно важно, когда расстояния между скважинами составляют 40 и более метров.

В качестве ещё одного примера возможности межскважинного радиопросвечивания в условиях вечной мерзлоты можно привести геоэлектрический разрез, построенный по данным РВГИ между скважинами 77-78 на Вилюйской ГЭС (Саха-Якутия). По результатам РВГИ, представленным на рис.5 видно, что горизонты низкого сопротивления не выдержаны по горизонтали. Так область низкого сопротивления в интервале 220-222 м имеет ограниченные размеры и расположена вблизи ствола скв.№77. Распределение электрических свойств пород в межскважинном пространстве позволяет предположить наличие между скважинами 77 –78 слабого тектонического нарушения с небольшой амплитудой смещения. В целом, полученное распределение электрических свойств пород позволяет охарактеризовать выделенные интервалы как горизонты наиболее интенсивной фильтрации.

Рис.5. Геоэлектрический разрез построенный по данным РВГИ между скважинами 77-78 Вилюйской ГЭС в июле 2000 г.

При мониторинге процессов оттайки горных пород и выделении фильтрующих горизонтов, проведение исследований только вдоль профиля скважин недостаточно, важно следить за изменениями электрических свойств пород в объеме, что позволит решать как 2-х, так и 3-х мерные задачи.

Технология объемного (3D) геоэлектрического картирования методом РВГИ была разработана ООО "Радионда LTD" и успешно применялась при поисковых работах на кимберлит в мерзлом массиве карбонатных пород. Применение объемного геоэлектрического картирования позволяет повысить точность локализации неоднородностей, оконтуривать их не только в разрезе, но и в плане, повышает надежность интерпретации данных радиопросвечивания.

Технология 3D – объемного геоэлектрического картирования методом РВГИ была разработана в ООО «Радионда », и успешно применялась в мерзлом массиве карбонатных пород при поисковых работах на кимберлит. Рассмотрим некоторые результаты этих исследований, выполненные в одном из районов Западной Якутии по сети скважин 400х400 м на площади более 50 кв.км . Обобщенный схематический разрез поисковой площади представляет собой горизонтально-слоистую среду, состоящую из двух основных областей. Кимберлитовое тело представляет собой субвертикальный штокверк сложной формы, прорывающий окружающие породы. В целом, кимберлит характеризуется пониженным $\rho \cong 40 - 120$ Омм. Однако, удельное сопротивление плотного кимберлита может достигать 300-560 Омм и их электрическая контрастность относительно вмещающих пород обеспечивает избыточное поглощение радиоволн и соответствующую интенсивность аномалий порядка 30-80%. Приведенные здесь значения $\rho_к$ получены по данным радиоволновых исследований на частотах 0.156 –0.625 МГц и характеризуют свойства пород в естественном залегании при температуре –3 - -5° С.

На рис.6а,б представлены фрагменты 3D геоэлектрической карты в виде горизонтального сечения на глубине 145 м и вертикального разреза по линии А1-А2 соответственно. На плане изолиниями $\rho_к$ выделяются и прослеживаются четыре линейно вытянутые в северо-восточном направлении области пониженных сопротивлений. Это области разломов I, II, III, IV, подтвержденные в последующем буровыми работами. Понижение сопротивления известняков в этих зонах связано с повышенной трещиноватостью, глинистостью и, возможно, засоленностью. Строение этих зон на глубине можно проследить по вертикальным разрезам. На разрезе также можно видеть, что изолиниями низких сопротивлений четко выделяется подошва перекрывающих терригенных отложений и «карманы» древней коры выветривания в кровле известняков. На стадии детальных исследований при расстояниях между скважинами 100-150 м, когда можно использовать более высокие частоты 0,625-1.25 МГц, разрешающая способность метода возрастает.

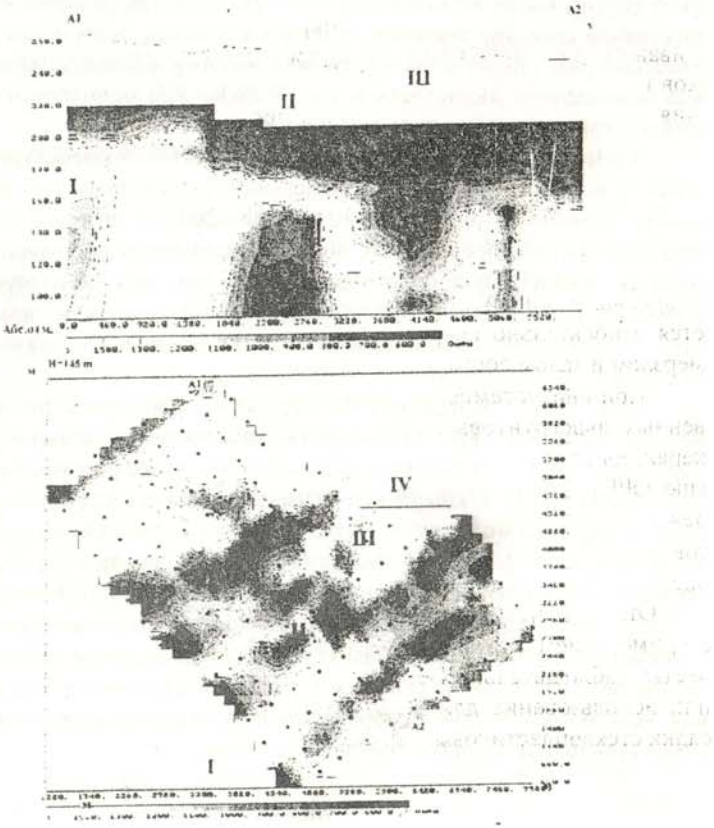


Рис.6. Фрагменты 3D геоэлектрической карты РВГИ (частота 156 кГц).
Участок детальных поисков. Сеть скважин 400х400 м.
а – горизонтальное сечение на глубине 145 м.
б – разрез по линии А1 – А2.

Заключение.

В итоге отметим, что высокие сопротивления мерзлых массивов обеспечивают значительную дальность радиоволновых межскважинных исследований, например в трещиноватых карбонатных породах до несколько сотен метров. При этом неоднородности геологического строения, в том числе и литологические, обладают электрической контрастностью в мерзлом состоянии достаточной для их уверенного выделения и локализации. Объемное геоэлектрическое картирование межскважинного пространства радиоволновым методом может быть эффективным средством при решении геокриологических задач по выявлению и оконтуриванию различного рода неоднородностей в массивах мерзлых пород, участков повышенной льдистости и т.п., а также при мониторинге в случае изменения во времени их температуры. Объемное геоэлектриче-

ское картирование межскважинного пространства радиоволновым методом эффективное средство решения геокриологических задач по выявлению и оконтуриванию различного рода неоднородностей в массивах мерзлых пород, участков повышенной льдистости и т.п., а также при мониторинге в случае изменения их температуры во времени и в пространстве.

Сравнительный анализ данных изменения температуры и электрических свойств пород в естественном залегании, полученных при измерениях в скважинах в период с июля 2000 г. по июнь 2002 г., позволяет оценить динамику процесса оттаивания мерзлых пород во времени и пространстве и выявить горизонты интенсивной фильтрации. Отметим, что рассмотренные результаты получены в условиях «высокотемпературной» мерзлоты, которая характеризуется относительно небольшими изменениями электрических свойств пород в мерзлом и талом состоянии.

При «низкотемпературной» мерзлоте, характерной при создании искусственных льдогрунтовых ограждений, контрастность изменения электрических характеристик будет значительно выше. Это позволяет рекомендовать технологию ОРВП-РВГИ в комплексе с измерениями температуры для создания надежной системы мониторинга за состоянием и свойствами замороженных грунтов в процессе формирования либо ликвидации льдогрунтового ограждения, оценки его размеров и сплошности, эффективности при эксплуатации и т.п.

Отметим, что для геофизического мониторинга льдогрунтовых ограждений с применением технологии РВГИ необходимо наличие дополнительного количества наблюдательных скважин с обсадкой из полиэтилена низкого давления, или использование для замораживающих скважин вместо металлической обсадки стеклопластиковых трубы.

Список литературы

1. Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания. Патент России №2084930 от 22.07.93.
2. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино, изд - во ПНЦ РАН, 1998, 515с.
3. Фролов А.Д., Истратов В.А., Лысов М.Г., Остапчук С.И. Радиоволновая геоинтроскопия мерзлых массивов. Материалы второй конференции геокриологов России, том4, М., изд-во МГУ, 2001, с 290 - 299.
4. Istratov V.A., Frolov A.D. Radio wave borehole measurements to determine the in situ electric property distribution in a massif. J. Geophys. Res.- Planets, Vol.108, No. E4, 10.1029/2002JE001880, April 2003.

УДК 551.345

ОЦЕНКА КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗИРУЕМЫХ ГРУНТОВ

С.Е. Гречищев (ФГУП Фундаментпроект, Москва)

Одной из самых сложных проблем при использовании в северной геотехнике искусственных охлаждающих устройств для замораживания грунтов оснований является возможность их криогенного пучения. Расчётная оценка величины пучения представляет определённые затруднения в связи со слабой разработанностью теории. Ниже приводится возможный вариант теоретического расчёта и произведённая с его помощью практическая оценка диапазона возможных значений пучения для одного из практических случаев использования метода термостабилизации (замораживания) слабых глинистых грунтов.

1. Постановка задачи

Проектом строительства железной дороги в одном из северных районов страны на переходе через реку предусмотрена термостабилизация неустойчивых грунтов основания в одном из берегов реки с помощью сезонно-охлаждающих устройств СОУ. Для обоснования глубины установки СОУ требовалось дать оценку возможных деформаций пучения грунтов под устоем моста и подходной насыпью к нему вследствие замораживающего действия СОУ.

По данным изысканий геологических разрез состоит из: 0 – 9 м – мерзлые суглинки и валуны; 9 – 28 м глина (немёрзлая); 28 – 42 м супесь (немёрзлая) водоносная с пьезометрическим уровнем напора на глубине 11 м от поверхности земли (т.е. 19 м выше кровли супеси); 42 м и ниже – глина (немёрзлая).

Проектом предусматривалась термостабилизация слабых глин, залегающих на глубине 9 –28 м в основании подходной насыпи и устоя моста. Термостабилизацию проектировалось осуществить с помощью рядов СОУ. Необходимую глубину установки СОУ требовалось определить, исходя из условия недопущения криогенного пучения грунтов основания более заданной величины. Очевидно, что в такой постановке целью расчётной оценки являются деформации пучения грунта, которые могут возникнуть после начала работы СОУ. Для этого была сформулирована математическая модель, на основе которой произведена оценка возможных масштабов явления путём численных экспериментов.

Поскольку в настоящее время двумерные (и тем более трёхмерные) математические модели пучения не разработаны, задача о пучении массива грунта вследствие работы СОУ была разделена на две проблемы: (а) бокового пучения вследствие радиального промерзания грунта вокруг каждой из СОУ и (б) вертикального пучения вследствие промерзания грунта вниз под рядами СОУ. Первая из них принципиально двух/трёхмерная. Вторая же в первом приближении может быть рассмотрена как одномерная.