ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ НА АКВАТОРИИ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

В.М. Никифоров, Е.А. Бессонова

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

ВВЕДЕНИЕ

На прибрежных акваториях, длительное время подвергавшихся антропогенному воздействию, находится достаточно большое количество крупных объектов с высокими значениями намагниченности – затопленные суда, их фрагменты, автомобили, обломки причальных конструкций и военной техники, неразорвавшиеся боеприпасы, металлические тросы, предметы быта, железные контейнеры, бочки с химическими веществами и т. д. Они перекрыты достаточно мощным слоем донных отложений и в большинстве случаев не могут быть обнаружены визуально при проведении водолазных работ. Актуальность поиска и локализации таких объектов дистанционными методами определяется широким кругом практических задач, которые можно объединить по целям реализации в две группы: удаление объектов со дна акватории, их дальнейшее использование на месте обнаружения.

Проведенными исследованиями, в рамках этой проблемы, решались различные частные задачи, связанные с улучшением экологической обстановки, оптимизацией хозяйственной деятельности в прибрежной зоне:

- выделение потенциально опасных источников техногенного генезиса на прибрежной акватории туристско-рекреационной зоны островных районов г. Владивостока;
- выявление и локализация затопленных объектов на акватории порта Восточный при проведении подготовительных работ по углублению дна;
- выявление затопленных объектов на акватории, прилегающей к островам Пахтусова, отведенной под товарное выращивание гидробионтов. Затопленные объекты, обладающие ферромагнитными свойствами, представляют поисковый интерес с целью их дальнейшего использования в качестве мёртвых якорей для закрепления установок культивирования морских беспозвоночных, поскольку при относительно небольших размерах такие объекты имеют достаточно большую массу.

В статье представлены результаты детальных магнитометрических исследований на отдельных участках прибрежной акватории зал. Петра Великого. Показаны возможности применения магнитометрии для выделения локальных неоднородностей геомагнитного поля, создаваемых сильно намагниченными объектами техногенного и антропогенного генезиса в морской воде и в донных отложениях.

Особенности методики магнитных измерений

Магнитометрия достаточно часто применяется для поиска ферромагнитных объектов в глинистых и песчаных отложениях, пресной и морской воде, во льдах и в зависимости от размеров источников позволяет обнаруживать их на достаточно больших глубинах [1–4].

Локальные неоднородности геомагнитного поля, создаваемые объектами с ферромагнитными свойствами, отличаются от аномалий геологического генезиса очень маленькими «точечными» размерами и высокими градиентами. Несмотря на то что аномалии магнитного поля геологической природы имеют несопоставимые по сравнению с аномалиями техногенного и антропогенного генезиса геометрические размеры, выделение локальных неоднородностей магнитного поля, создаваемых ферромагнитными объектами негеологического происхождения, в исследуемом районе может быть осложнено условиями геологической среды с контрастными магнитными свойствами. Также существуют ограничения по использованию метода вблизи железобетонных сооружений, электротехнических установок, которые создают высокоградиентные аномалии-помехи [5].

Обычно магнитометрические работы такой направленности выполняют с использованием феррозондовых, квантовых, протонных магнитометров. На современном этапе магнитная съемка для выделения аномалий техногенного генезиса достаточно часто применяется по

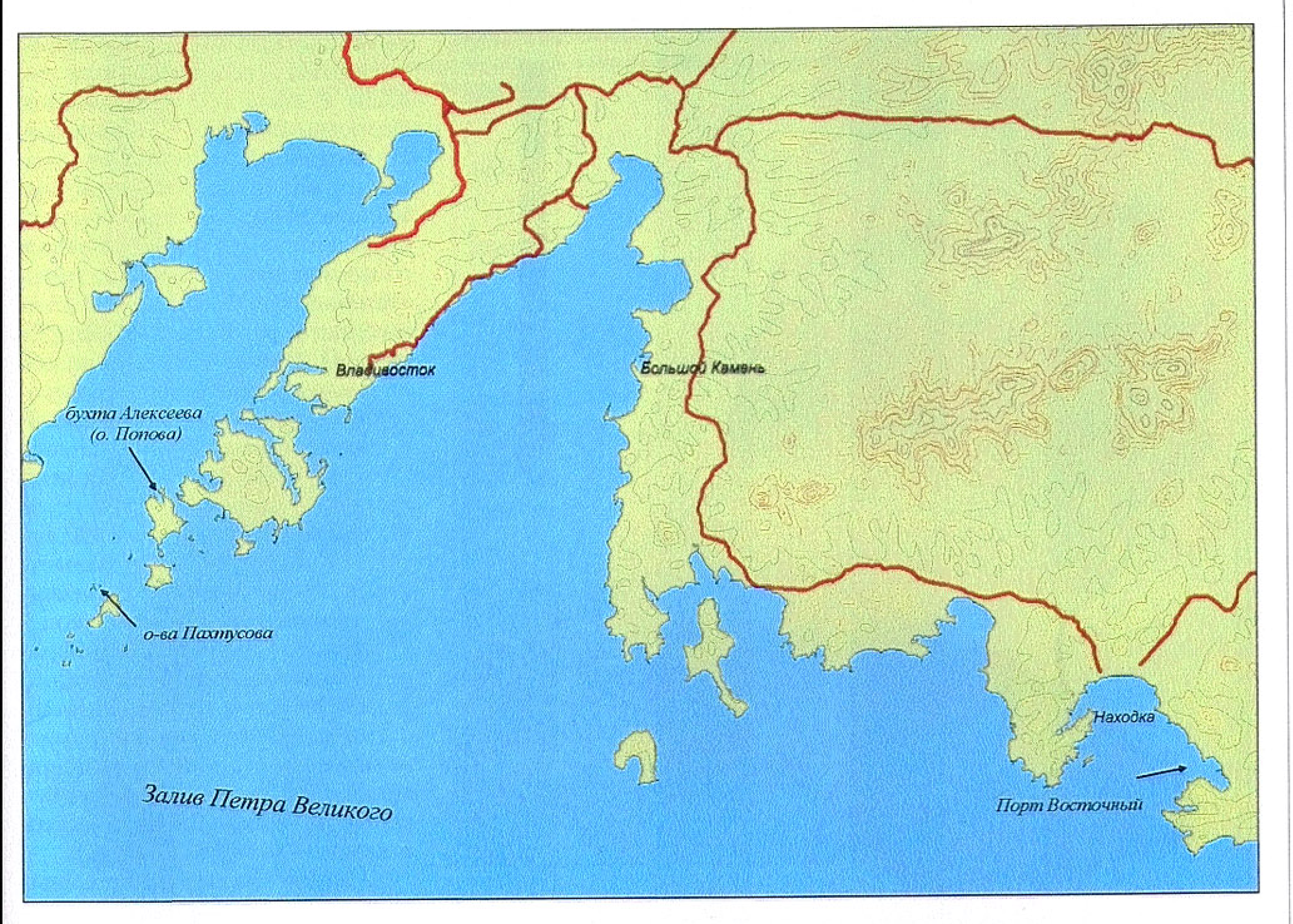

Рис. 1. Обзорная карта районов работ

методике высокоточной градиентометрии.

На локальных участках прибрежных акваторий зал. Петра Великого (рис. 1) измерения модуля полного вектора геомагнитного поля выполнены двумя протонными магнитометрами ММП-203. Один прибор использован для взятия отсчетов в точках наблюдений на полигонах, второй для измерений вариаций геомагнитного поля на контрольном пункте.

При выполнении магнитного картирования на акваториях реализованы два варианта методики измерений:

- микромагнитная съёмка по льду в бух. Алексеева (о-в Попова),
- гидромагнитные измерения на немагнитной платформе на акваториях порта Восточный и островов Пахтусова.

На акватории бух. Алексеева полевые работы выполнены в зимнее время. Параметры сети наблюдений выбраны в соответствии с глубиной до поверхности дна акватории, которая на участке измерений составляла 2–5 м. Расстояние между профилями 2 м, шаг по профилю – 1 м. Топографическая привязка осуществлена по относительной системе координат.

Измерения на акваториях островов Пахтусова и порта Восточный выполнены на борту резиновой лодки. Расстояние между точками измерений 4–8 м, между профилями – 20–50 м. Топографическая привязка точек измерений выполнена с использованием GPS-приемников Garmin-12, Magellan Sport Trak.

Аномальное магнитное поле районов исследования

Аномальное магнитное поле (АМП) рассчитано на основе представления наблюденного геомагнитного поля T в виде суммы: нормального (Tn), аномального (Ta) полей и поля вариаций (δT): $T=Tn + Ta + \delta T$.

АМП островов Попова, Пахтусова характеризуется сложной морфологией, высокой интенсивностью и определяется прежде всего происхождением и особенностями размещения геологических тел с различными содержаниями минералов магнетитового ряда (рис. 2, 3) [6, 7].

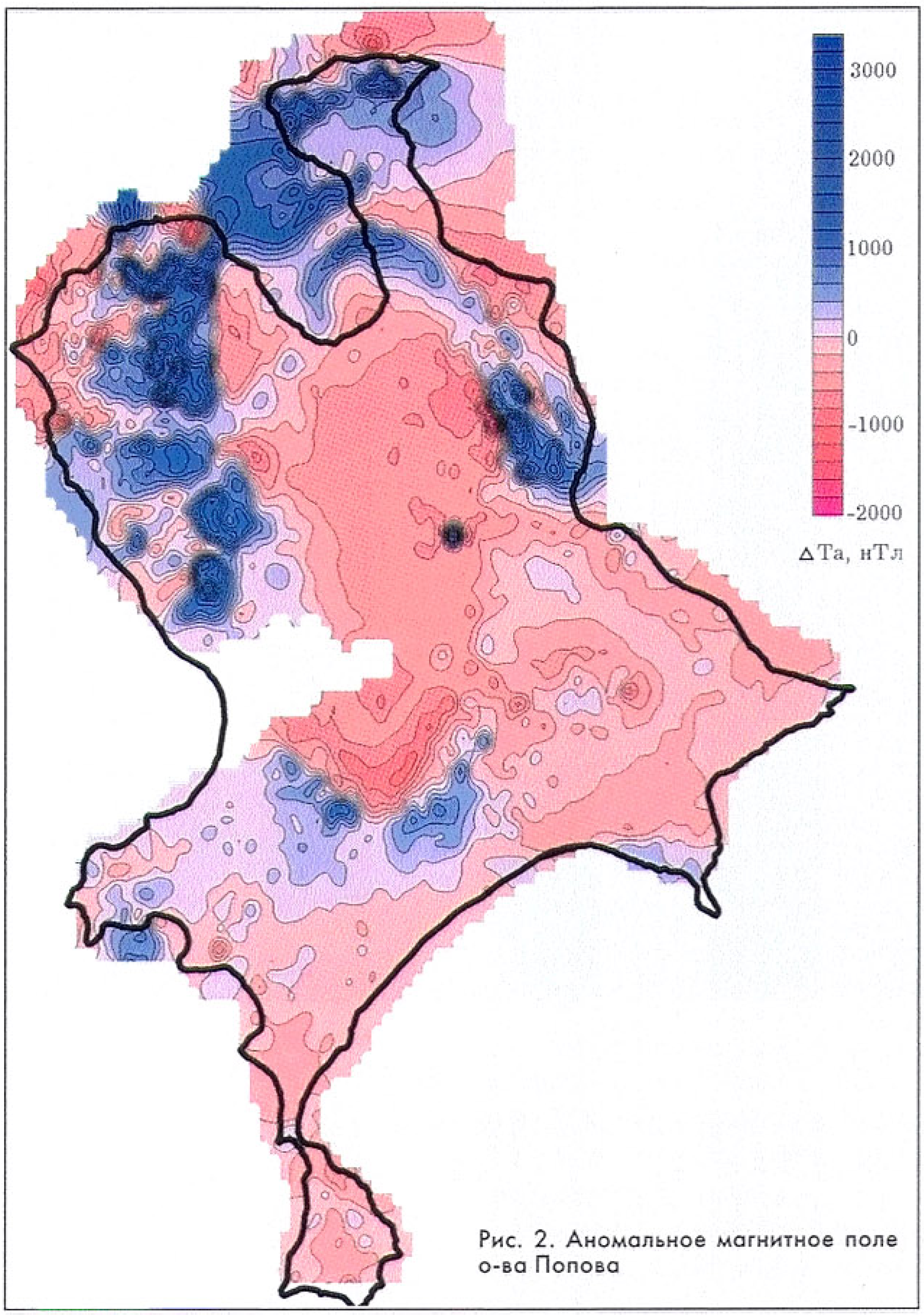

Рис. 2. Аномальное магнитное поле о-ва Попова

Контрастное сочетание кислых и основных разностей магматических пород, имеющих сложные пространственно-структурные соотношения, определяет градиентную структуру аномального магнитного поля. Положительные магнитные аномалии (обычно линейно вытянутые), как правило, связаны с интрузивными телами основного состава. Такие аномалии занимают значительные площади, аномалообразующие тела отличаются повышенными концентрациями магматогенного магнетита. Наиболее высокие значения аномального магнитного поля отмечаются на участках развития небольших штокверковых тел акцессорного магнетита, образованных в ходе кристаллической и гравитационной дифференциации магмы базитового состава. Положительные мозаичные высокоградиентные аномалии соотносятся с зонами вторичных изменений с проявлениями жильной магнетитовой минерализации. На островах Попова, Пахтусова выделены локальные высокоградиентные аномалии магнитного поля, интерпретируемые подповерхностными геологическими телами с высоким содержанием ферромагнитных минералов. В частности, локальная аномалия магнитного поля на о-ве Попова восточнее прол. Старк, выделенная по результатам микромагнитной съемки, представляет собой диполь с амплитудами от 800 до -1600 нТл (рис. 4). Положительный полюс аномалии расположен на северо-западе, отрицательный – на юго-востоке. Градиент магнитного поля до 1900 нТл/м. Высокий градиент поля свидетельствует о неглубоком залегании объекта, что подтверждено количественными расчетами. Вычисленная глубина залегания верхней кромки составляет 0,7 м. Граница нижней кромки залегания намагниченных пород оценена в 1–2 м. На участке микромагнитной съемки ниже и выше по склону выполнены три точки вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) (рис. 5).

Анализ кривых ВЭЗ показывает, что по своему виду они соответствуют горизонтально-слоистому разрезу. На всех кривых в верхней части разреза отмечен высокоомный слой мощностью до 2 м. Ниже выделен слой пониженного сопротивления, соответствующий породам типа легкого суглинка или супеси. В нижней части разреза сопротивление соответствует слаботрещиноватым магматическим породам.

Шурфами на глубине 0,5–1 м были вскрыты темноцветные породы, скорее всего, габбро с максимальными для центральной восточной части о-ва Попова значениями магнитной восприимчивости (χ = 110–120 · 10^{-3} ед. СИ). Вес магнитной фракции в шлихах, отобранных ниже по распадку, максимальный для исследуемой территории. Ниже располагается слой, представленный, вероятно, относительно слабомагнитными магматическими породами.

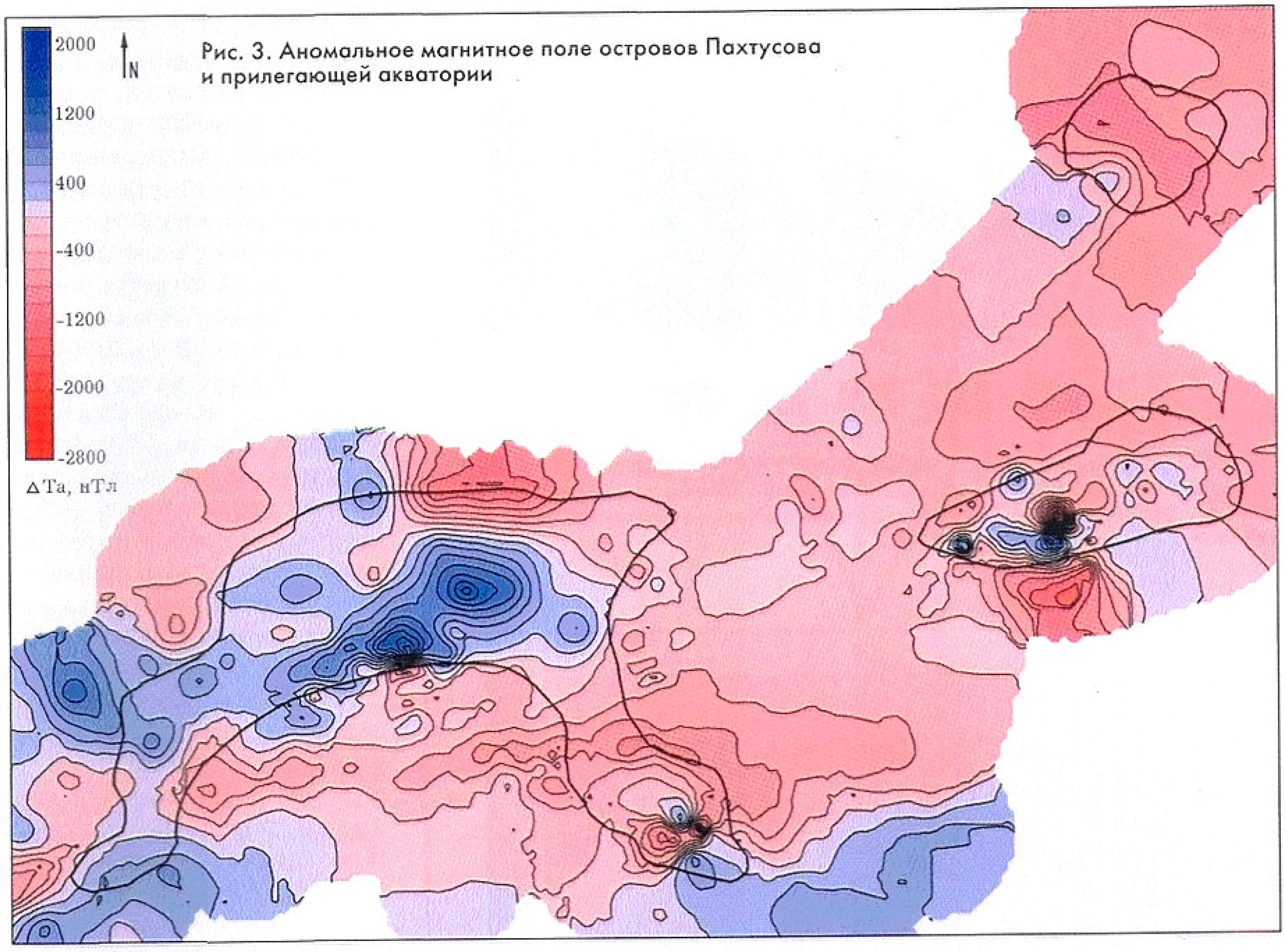

Рис. 3. Аномальное магнитное поле островов Пахтусова и прилегающей акватории

Таким образом, анализ результатов микромагнитной съемки в комплексе с результатами ВЭЗ показал, что высокоградиентная локальная аномалия магнитного поля в форме диполя связана со скоплениями обломков обогащенных магнетитом магматических пород (габбро), скатившихся по склону и расположенных в близповерхностной части коры выветривания. Разделить техногенные и геологические источники локальных аномалий такого типа весьма трудная и не всегда разрешимая задача.

Исследуемый участок (о-в Попова) расположен в западном замыкании положительной аномалии, отражающей влияние тела габбро субширотного простирания, перекрытого рыхлыми отложениями прибрежно-морского генезиса значительной мощности (50–150 м) (рис. 2).

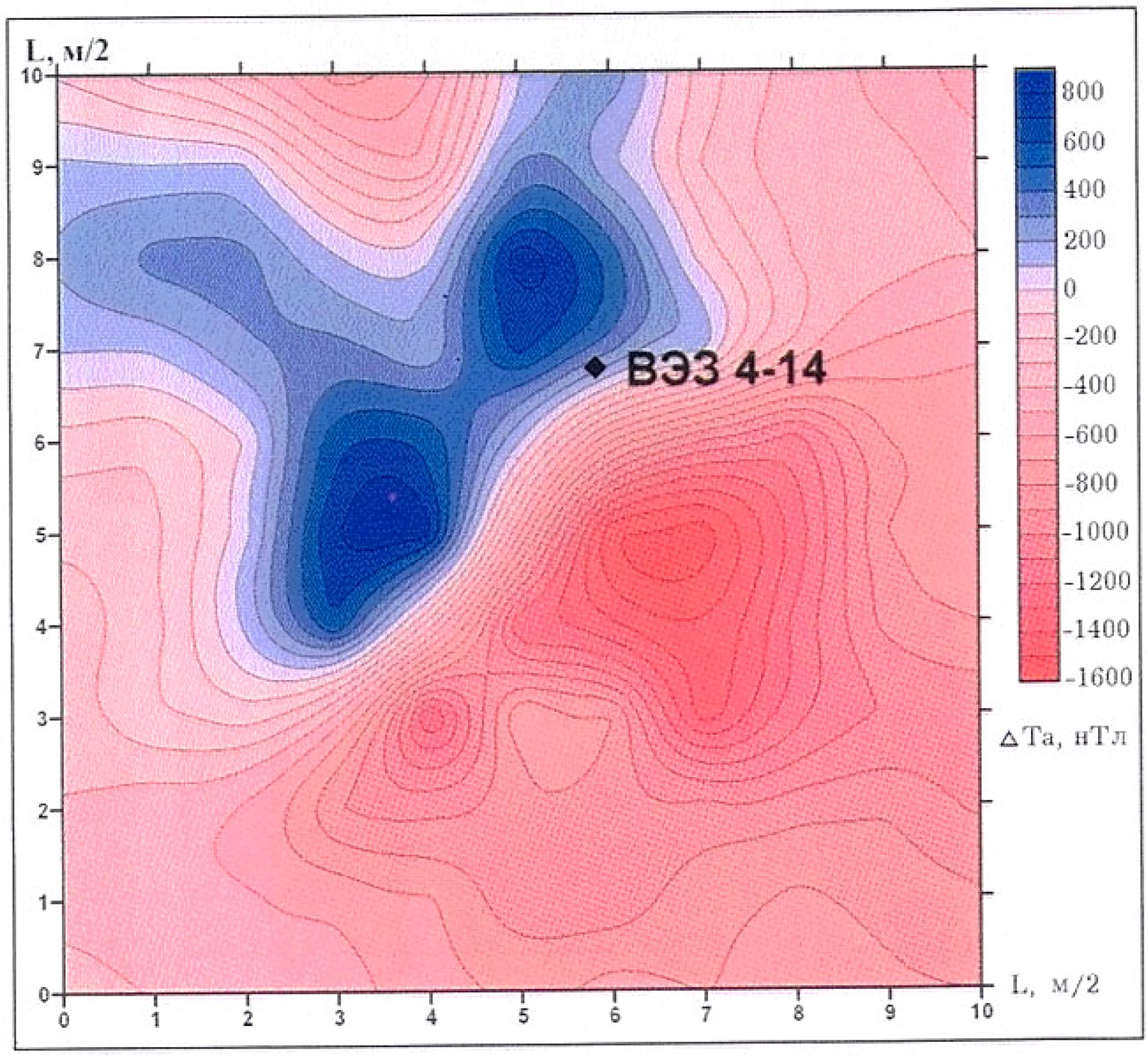

Рис. 4. Локальная аномалия магнитного поля геологического генезиса (о-в Попова)

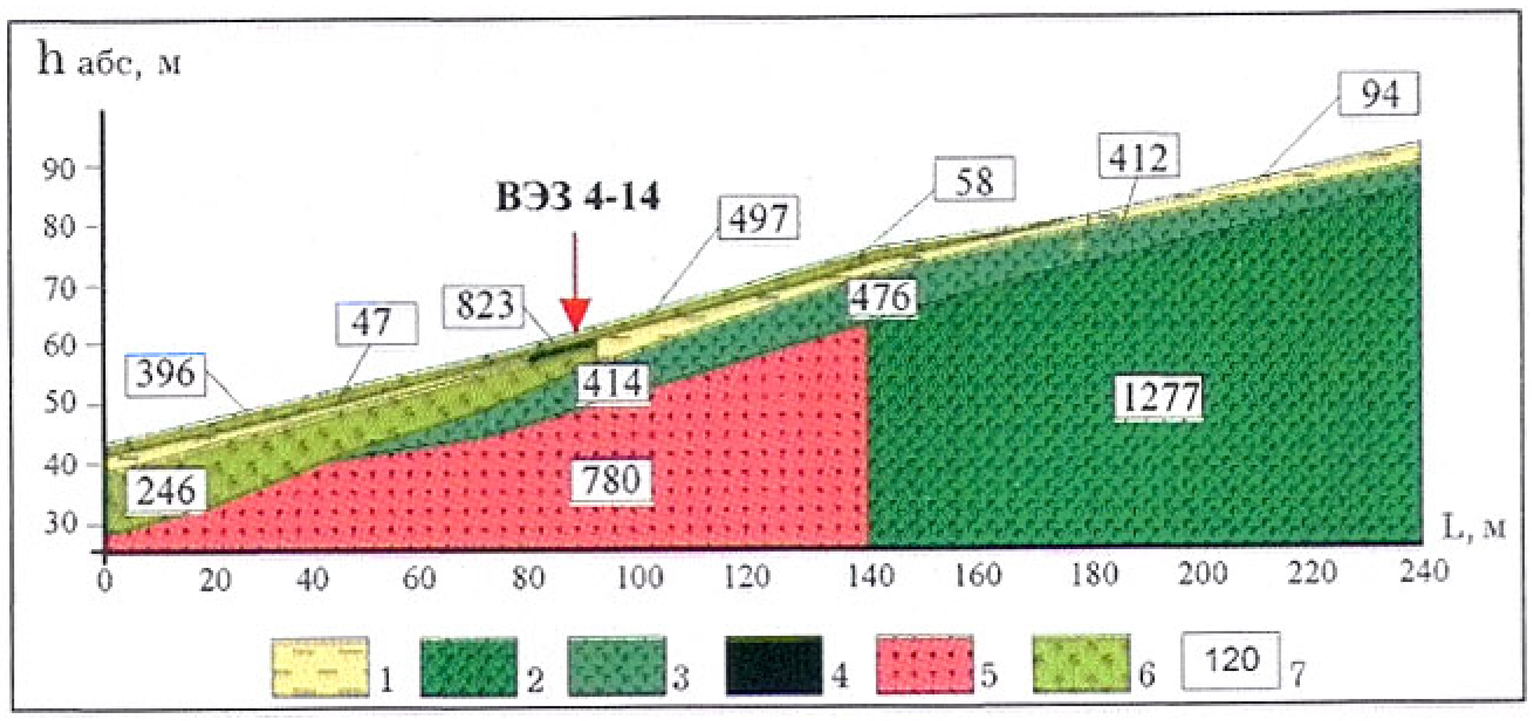

Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ. 1 – суглинки, 2 – габбро, 3 – трещиноватые габбро, 4 – обломки сильномагнитных коренных пород, 5 – граниты, 6 – свалы габбро, 7 – удельное электрическое сопротивление горных пород Ом·м

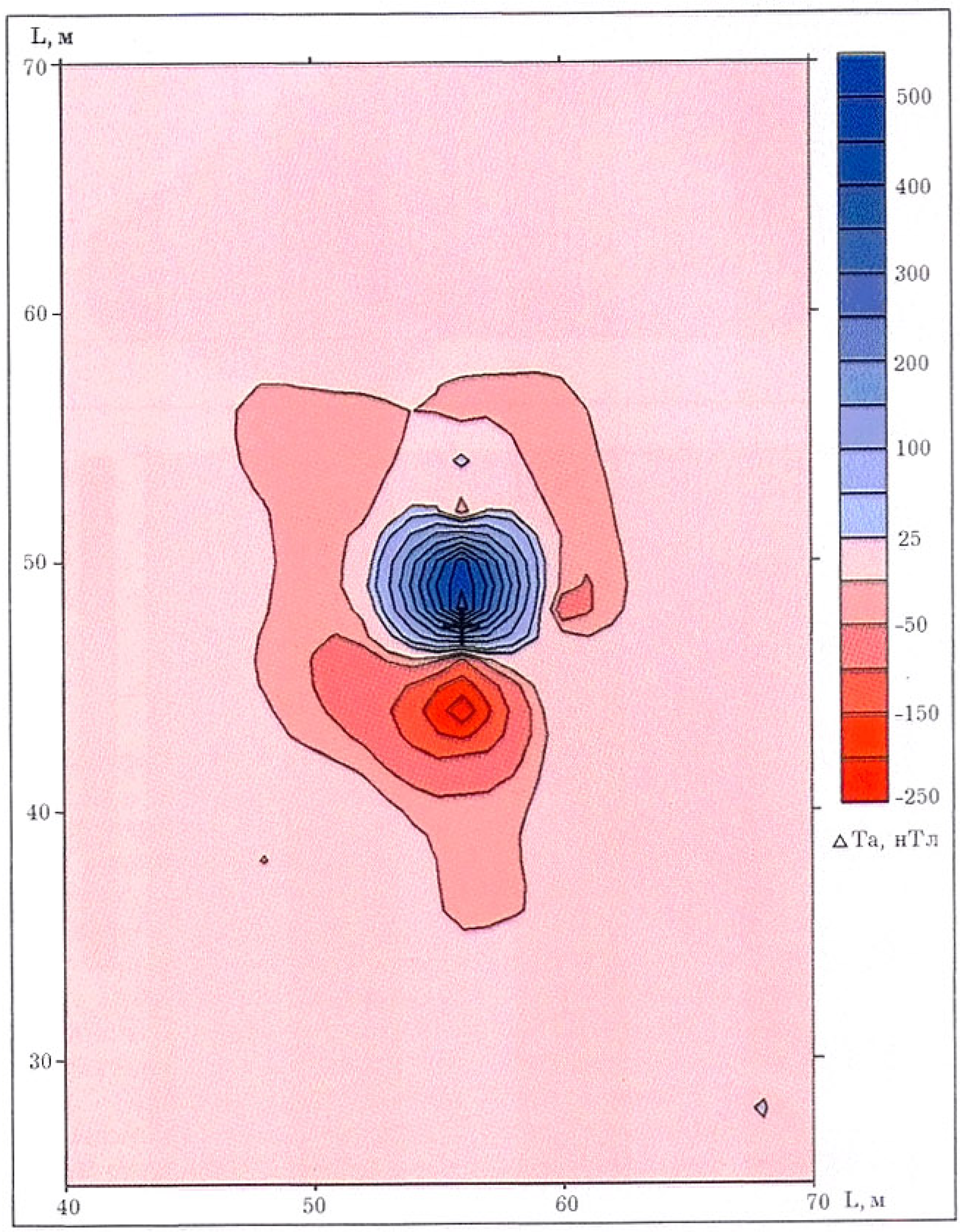

Рис. 6. Локальная аномалия магнитного поля техногенного генезиса (акватория бух. Алексеева, о-в Попова)

Аномальное магнитное поле акватории, прилегающей к островам Пахтусова, характеризуется линейно вытянутыми отрицательными аномалиями субширотного простирания с высокоградиентными участками вблизи береговой линии (рис. 3). Характер изменения поля отражает влияние магнитных свойств геологических тел вулканогенно-осадочного комплекса. Высокоградиентные участки связаны с резкими изменениями магнитных свойств в зонах контакта вулканогенно-осадочных пород и интрузивных тел габбро. В отдельных случаях участки резких градиентов поля связаны с вертикальными уступами рельефа дна.

АМП порта Восточный определяется геологическим строением исследуемой территории и железобетонными конструкциями портовых сооружений. В геологическом отношении исследуемая территория расположена в центральной части гранитного массива раннемелового возраста. Крупнокристаллические лейкократовые граниты с высоким содержанием слюд характеризуются низкими значениями намагниченности, их вклад в аномальное магнитное поле незначителен. В пределах исследуемой территории не выявлено локальных аномалий магнитного поля геологического генезиса. Высокоградиентное уменьшение значений аномального магнитного поля в южной части полигона связано с влиянием железобетонных конструкций портовых сооружений.

Аномальное магнитное поле, полученное в результате проведенных детальных исследований, определяется аномалообразующими источниками геологического и техногенного генезиса. Научный и практический интерес в данном случае представляют локальные аномалии разных уровней, выделение которых из суммарного

аномального поля носит условный характер. На исследуемых акваториях «региональной» составляющей локальных аномалий является аномальное магнитное поле первого уровня, определяемое источниками геологического (о-в Попова, острова Пахтусова) или смешанного геологического и техногенного генезиса (порт Восточный) – $Tl_г$. Ферромагнитные объекты, представляющие поисковый интерес, являются источниками локального аномального магнитного поля второго уровня Tl_a. Таким образом, аномальное магнитное поле можно представить в виде суммы $T_a = Tl_г + Tl_a$.

В основу разделения аномалий положено представление о том, что аномалообразующие объекты имеют несопоставимые размеры и контрастные магнитные свойства. Таким образом, разделение фоновой и локальных составляющих аномального магнитного поля может быть выполнено на основе анализа спектральных характеристик. Для выделения фоновой составляющей в данном случае реализованы вычисления с использованием низкочастотного фильтра Гаусса. Выделение локальных аномалий магнитного поля выполнено на основе результатов разностных вычислений: $Tl_a = T_a + T_{Gauss}$.

Локальные аномалии магнитного поля техногенного и антропогенного генезиса

Локальные аномалии магнитного поля, создаваемые объектами с высокой намагниченностью, морфологически выражены диполями, ориентированными по магнитному меридиану. Если объект характеризуется значительной остаточной намагниченностью, ориентация диполя будет соответствовать её направлению.

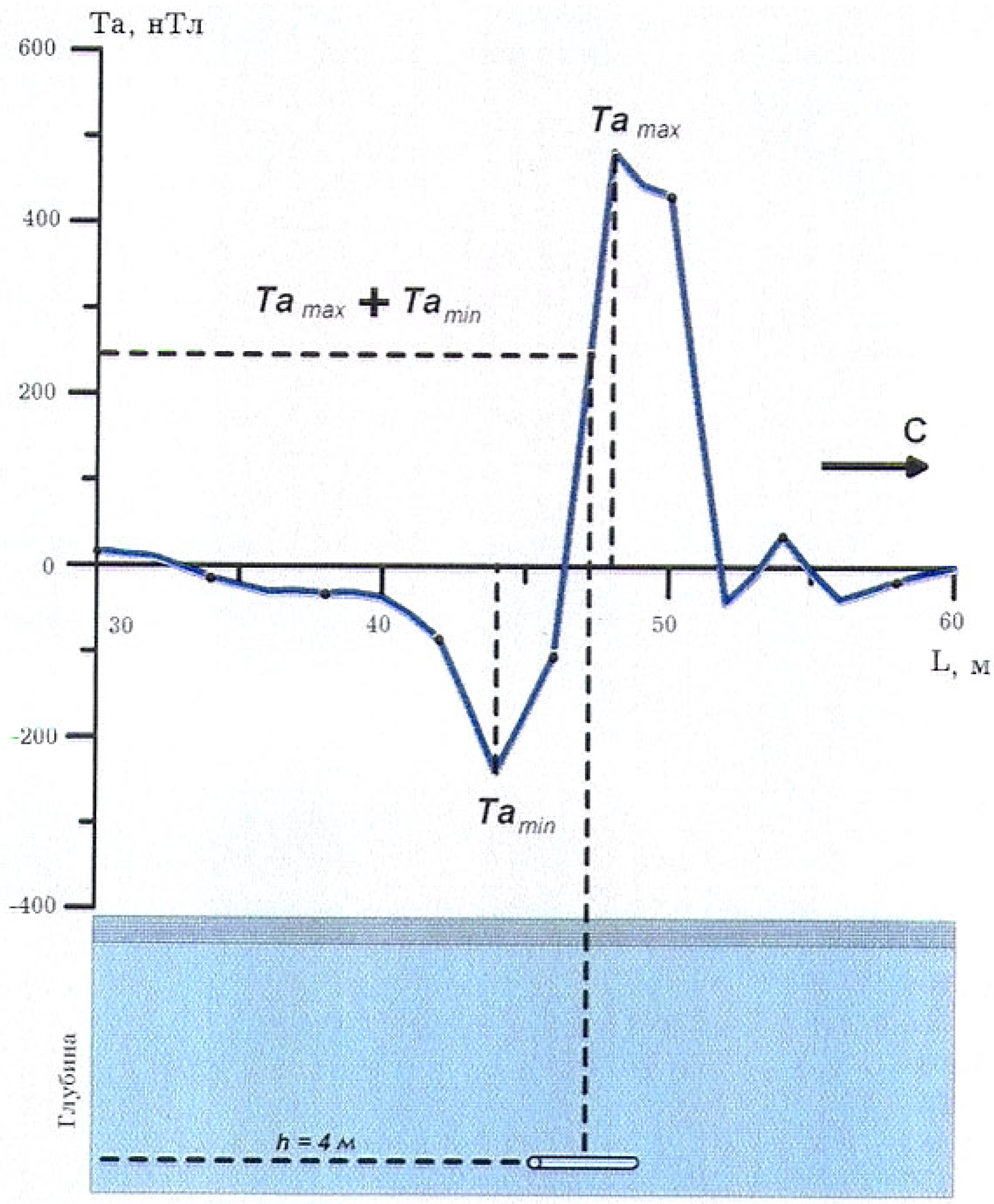

Рис. 7. Количественная интерпретация аномалии магнитного поля техногенного генезиса (акватория бух. Алексеева, о-в Попова)

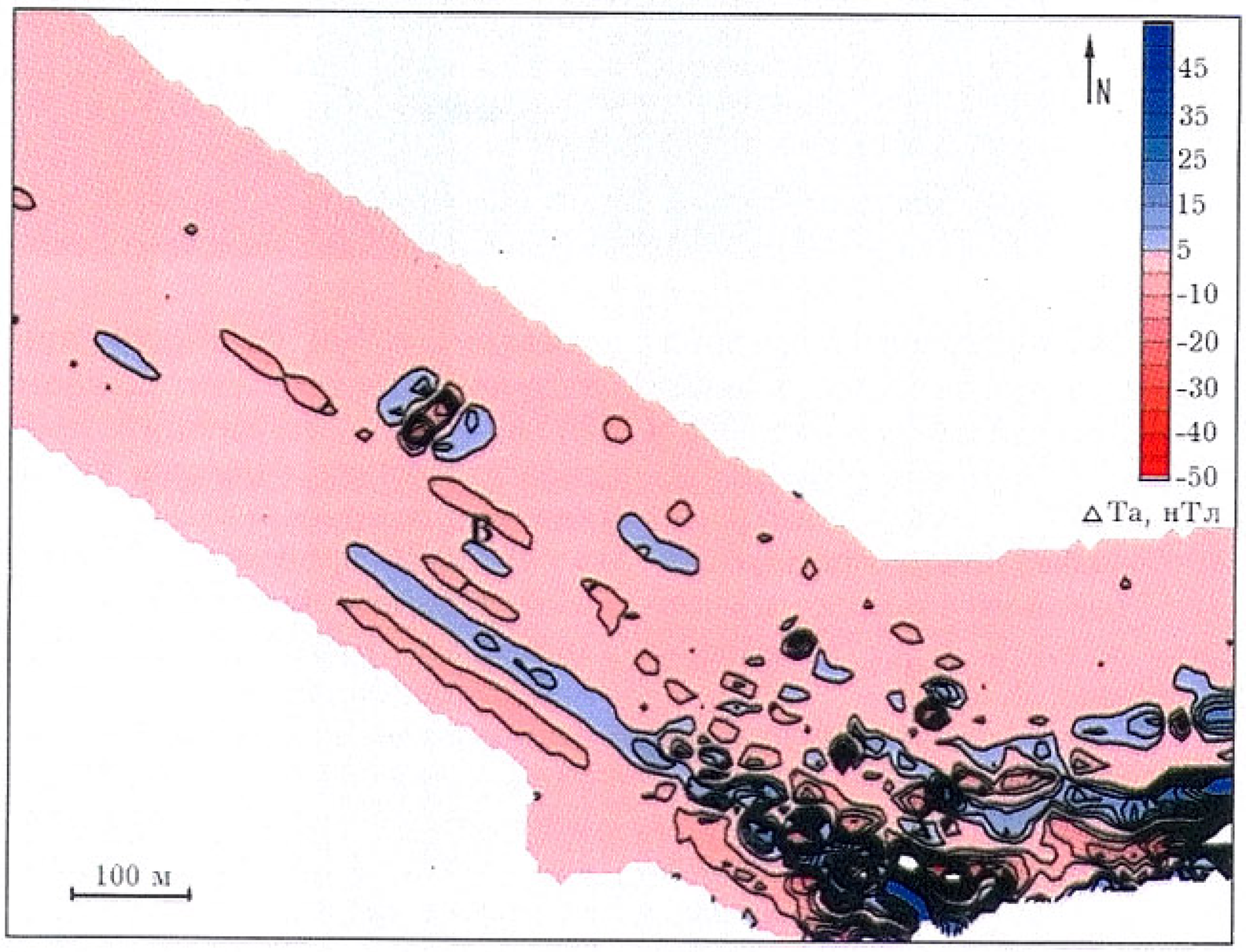

Рис. 8. Карта локальных аномалий магнитного поля техногенного генезиса (акватория порта Восточный)

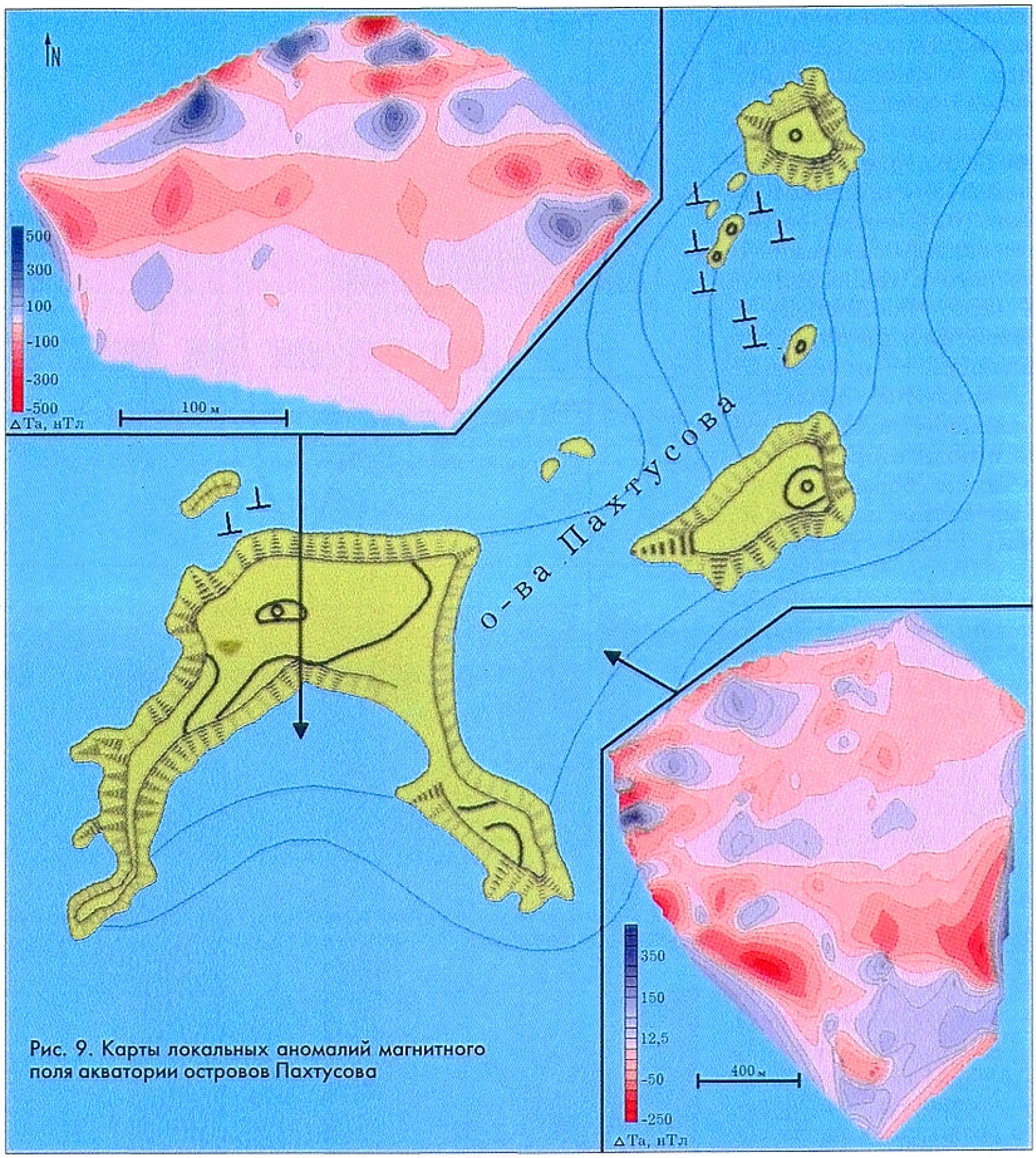

Рис. 9. Карты локальных аномалий магнитного поля акватории островов Пахтусова

На дне акватории бух. Алексеева в результате проведенных исследований на глубине 3–4 м уверенно выделен объект, обладающий ферромагнитными свойствами, аппроксимированный горизонтальным цилиндром длиной 4 м, диаметром 0,4 м (рис. 6, 7).

В аномальном магнитном поле объект выражен высокоградиентной (180 нТл/м) аномалией в форме диполя, ориентированного положительным полюсом на север. Диапазон амплитуд составляет 721 нТл. Аномалообразующее тело представляет собой фрагмент причальной конструкции. Влияние аномального магнитного поля геологического генезиса устранено полностью.

На акватории порта Восточный большая часть локальных аномалий, отражающих влияние затопленных ферромагнитных объектов, сосредоточена вблизи причальной стенки. Поисковый интерес представляют две локальные аномалии, выделенные в фарватере акватории порта (рис. 8). Аномалообразующие объекты залегают на достаточно большой глубине 9–11 м. Объект *A* отражен в магнитном поле локальной аномалией в форме диполя, ориентированного положительным полюсом на север. Диапазон амплитуд 64 нТл. При выполнении водолазных работ в месте локализации обнаружен большой моток железного троса. Вторая локальная аномалия магнитного поля ***B*** характеризуется минусовыми значениями в центре и имеет два положительных максимума по бокам. Диапазон амплитуд 56–64 нТл. Аномалия интерпретирована ферромагнитным объектом в форме параллеле-

пипеда. Имеет достаточно большие горизонтальные размеры: ширина 4–5 м, длина – 12–18 м.

По результатам магнитной съемки на акватории островов Пахтусова, в соответствии с задачами работ, локализованы несколько аномалообразующих объектов с ферромагнитными свойствами на дне (рис. 9). Выделен градиентный локальный участок аномального магнитного поля в зоне контакта геологических тел, который может иметь как геологический, так и техногенный генезис. Известно, что на дне акватории островов Пахтусова затопленные объекты представляют собой обломки затонувших маломерных судов, вагонетки и рельсы, использовавшиеся при рыбозаготовках.

ВЫВОДЫ

Как показали проведенные исследования, предельная глубина обнаружения ферромагнитных объектов по результатам магнитной съемки с поверхности определяется прежде всего размерами объектов поиска. Затопленные объекты, обладающие ферромагнитными свойствами и представляющие поисковый интерес, имеют относительно небольшие размеры 1–4 м и могут быть обнаружены на глубине до 10–12 м. Большое значение имеет методика выполнения измерений.

Магнитометрические работы по льду позволяют выполнить измерения на высоком качественном уровне, который определяется возможностью точной фиксации точек наблюдений за счёт создания регулярной сети измерений с относительной системой координат, параметрами заранее рассчитанной сети измерений с учетом глубин до дна и предполагаемых размеров объектов поиска, фиксированным расстоянием магниточувствительного преобразователя магнитометра от поверхности льда.

При проведении гидромагнитных измерений на немагнитной платформе съёмка по регулярной сети сопряжена со значительными трудностями и определяется: смещением платформы в условиях даже небольшого волнения, значительными трудозатратами при крупномасштабных работах, техническими характеристиками протонного магнитометра (влагопроницаемость, ориентационная погрешность) и т. д. Кроме того, качество съёмки осложняется высокой погрешностью топографической привязки точек измерений, которая определяется использованием для этих целей GPS-приёмников без введения дифференциальных поправок (DGPS). Сложность обработки результатов измерений в порту Восточный связана с высоким уровнем помех, создаваемых портовыми электротехническими устройствами.

Качество выделения техногенных и антропогенных аномалообразующих объектов на дне прибрежных акваторий можно повысить, для этого необходимо:

- повышение разрешающей способности измерительной аппаратуры,
- уменьшение расстояния от измерительной аппаратуры до объектов исследования,
- исключение влияния геомагнитных вариаций, техногенных помех и аномальной составляющей магнитного поля геологического генезиса за счет использования градиентометров.

В связи с вышеизложенным для выполнения подобных работ на прибрежной акватории чрезвычайно актуально применение подводных аппаратов.

Работы выполнены при поддержке грантов ДВО РАН 06-III-Д-07-307 и РФФИ-ДВО 06-08-96013. Авторы выражают благодарность Г.Ф. Подкорытову, оказавшему помощь при выполнении исследовательских работ на островах Пахтусова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов С.О. Магниточувствительные поисковые приборы // Специальная техника. 2000. № 6. http://st.ess.ru/publications/6_2000/arbuzov/arbuzov.htm

2. Касьяненко Л.Г., Горшков Э.С., Золотов И.Г., Розе Е.Н. Использование магнитометрических методов для обнаружения затопленного химического оружия // Российский геофизический журнал. 1997. № 7–8.

3. Щербаков Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающихся средах: для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. М.: Арбат-Информ, 1998. 127 с.

4. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Оценка предельной глубины обнаружения ферромагнитных объектов искусственного происхождения в толще полупроводящей среды // Специальная техника. 2004. № 2. http://st.ess.ru/publications/2_2004/sherbakov/sherbakov.htm

5. Ревякин П.С., Бородовой В.В., Ревякина Э.А. Высокоточная магниторазведка. М.: Недра, 1986. 272 с.

6. Бессонова Е.А., Гаврилов А.А. Геологическая интерпретация аномального магнитного поля о. Попова (залив Петра Великого, северо-западная часть Японского моря) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сес. междунар. семинара им. Д.Г. Успенского, Екатеринбург, 30 января–3 февраля 2006 г. Екатеринбург: Ин-т геофиз. УрО РАН, 2006. С. 38–43.

7. Гаврилов А.А., Бессонова Е.А., Колпащикова Т.Н. Геологическая интерпретация аномального магнитного поля островов залива Петра Великого (северо-западная часть Японского моря) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 34-й сес. междунар. семинара им. Д.Г. Успенского, 29 января–3 февраля 2007 г. М.: ИФЗ РАН, 2007. С. 69–71.