

Опыт применения 3D-технологий интерпретации магнитных полей на археологическом объекте «Аркаим»

Кочнев В.А.^{*}, Зданович Г.Б.^{**}, Пунегов Б.Н.^{**}

Аннотация

В докладе приведены результаты использования технологии для построения трехмерных моделей магнитной восприимчивости приповерхностной части по детальной съемке на участке 30x40 м. на объекте Аркаим. Приводятся карты, разрезы и графики. Делается вывод о перспективности магнитометрических исследований в археологии.

Предпосылки проведения эксперимента.

Как показал опыт, интерпретация магнитных полей и их некоторых преобразований дает положительный результат при обнаружении археологических объектов без вскрытия. Предпосылками к этому являются отличия магнитной восприимчивости строительного материала стен, грунта, почвы закрывшей археологический объект. Положительным примером этого было использование магнитных полей на археологическом объекте Аркаим.

В рамках данной работы предпринята попытка сделать шаг в построение модели магнитных свойств пространства, под поверхностью рельефа. Для этой цели была применена разработанная нами для изучения геологических объектов технология. Точно такая же технология разработана нами и для интерпретации гравитационных полей.

В основе технологии лежит пакет программ ADGM-3D, который позволяет рассчитывать поля магнитные и гравитационные от известных объектов, порождающих поля (прямая задача), а по наблюдаемым аномальным полям – параметры объектов (обратная задача).

Модель среды и метод решения

Для решения этих задач принята слоисто-блочная модель. Элементарным объектом составляющим модель является прямоугольный параллелепипед. Горизонтальные разрезы параллелепипедов во всей области интерпретируемого объекта одинаковы и определяются сеткой наблюдений. Вертикальные разрезы предопределяются границами слоев. Для решения прямой задачи используются известные формулы [2]. Для решения обратных задач используется адаптивный метод решения систем алгебраических уравнений (линейных и нелинейных). Метод не накапливает ошибок и позволяет решать системы большой размерности [3,4,5].

Исходные данные

Перейдем непосредственно к изучаемому объекту. На рис. 1 на фоне известной вам модели, объект Аркаим, показан участок, который был использован для опытной интерпретации. На рис. 2 показан рельеф местности изучаемого участка. Съемка магнитного поля велась по сетке 0.5x0.5. Размер изучаемого участка 30x40 м. Число точек 61x81=4941.

На рис.3 показано исходное магнитное поле в палитре с 10 цветами. Отрицательные поля показаны красными цветами, положительные – синими. В поле выделяются две полосы положительных аномалий, совпадающие с направлением положительных форм рельефа. Пределы изменения поля от –116 до 123 нТл. На их фоне выделяются прямоугольные формы слабopоложительных аномалий (темно зеленый цвет). На их фоне выделены две интенсивные сложной формы аномалии. Первая находится в центральной части (профиль 0), вторая севернее. (Следует учитывать, что направление на север идет примерно по диагонали – с нижнего левого угла в верхний правый)

^{*} Институт вычислительного моделирования СО РАН, г.Красноярск. kochnev@icm.krasn.ru

^{**} Специализированный природо-ландшафтный и историко-археологический центр «Аркаим», г.Челябинск

На профиле –1500 находится отрицательная аномалия, связанная с естественным углублением. Обращают на себя внимание две области со спокойным полем (желтые пятна в нижней и центральной части рисунка).

Результаты решения обратной задачи

Для того, чтобы решать обратную задачу необходимо задать начальное приближение модели. При решении задачи на однослойной модели решение находится, но оно оказывается неустойчивым. Минимальная невязка оказывается на первой итерации, на последующих она увеличивается. (Невязка – это разность между исходным значением поля и модельным). После ряда экспериментов за основу была принята трехслойная модель среды с границами слоев, повторяющих по форме поверхность рельефа. Мощности слоев были приняты равными 30, 60 и 120 см. Таким образом, общая мощность модели составила 210 см.

Предполагалось, что магнитная восприимчивость во всех слоях равна $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а погрешность начального приближения $10 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

При решении обратной задачи были получены следующие невязки по итерациям:

9.7 5.2 3.9 3.1 2.6 нТл.

За 1 час счета была получена 3-слойная модель магнитной восприимчивости по всему участку. На рис. 4 показано магнитное поле, рассчитанное от модели. Оно практически неотлично от исходного. Близость исходного и модельного магнитного поля говорит о том, что получено одно из возможных решений. На рис. 5 видим магнитную восприимчивость пород первого 30 см слоя. Она меняется от 4 до $92 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. На картинке мы более отчетливо видим те особенности форм, которые были видны в магнитном поле. Особенно подчеркнуты области спокойного (не техногенного) поля выделенные светло-зеленым, желтым и красным цветом.

Распределение магнитной восприимчивости пород второго слоя показана на рис. 6. Здесь в сглаженном варианте видим те же особенности, отмеченные ранее. Свойства магнитной восприимчивости модели пород третьего слоя (показаны в индивидуальной локальной палитре), видим на рис. 7. Пределы изменения равны от 13 до 38 (т.е. $38 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). На рис. 8 показана трехмерная модель магнитной восприимчивости. Далее посмотрим наиболее интересные разрезы сначала по широтному, а затем по меридиональному направлению. На верхнем кадре рис. 9 видим разрез по профилю –1500, проходящий через отрицательную аномалию, находящуюся южнее вала. Здесь следует отметить две особенности. Верхний слой имеет повышенную магнитную восприимчивость, а нижние – пониженную. Особенно это отмечено в области понижения рельефа. Второй кадр представляет разрез проходящий по одной из положительных аномалий. Здесь отмечены два участка с повышенной магнитной восприимчивостью: в центре и справа. Причем первая приурочена к отрицательной форме рельефа, а вторая к положительной. Третий кадр – это сечение по профилю +500. Здесь слева во впадине имеем понижение значения магнитной восприимчивости. Обратите внимание, что пониженной области рельефа за пределом крепости (кадр 1) и в пределах крепости (кадр 3) соответствует область плавного изменения и пониженного значения магнитной восприимчивости. Не говорит ли это, что на данном участке крепости отсутствуют стены жилищ или каких-то сооружений? Может быть внутри крепости был небольшой водоем, окруженный деревьями?

На рис. 10 показаны профили, проходящие с нижней части участка к верхнему. По ним видны все особенности, указанные на широтных профилях.

Экспериментальная обработка 4-уровневых наблюдений

На небольшом участке 20x1.5 м геофизиками были проведены экспериментальные работы. Была проведена съемка магнитного поля на 4-х уровнях: на поверхности и на 5, 15, 25 см выше ее. Исходные и подобранные магнитные поля приведены на рис. 11. Вид исходных и подобранных кривых на рис. 12.

Используя возможности пакета, проведем расчет магнитного поля на 7 уровнях, повторяющих поверхность. Первый на поверхности, а последний на высоте 3.5 м. Как видно, на последних двух уровнях магнитное поле близко к 0. Анализируя результаты моделирования, мы приходим к выводу, что наиболее оптимальным уровнем наблюдения могли бы быть 0, 15, 30 и 60 см.

Краткая характеристика возможности технологии.

Основой является пакет программ ADGM-3D. Размеры модели по числу профилей, точек, слоев и число уровней наблюдения не ограничены. Быстрый и устойчивый метод решения обратных задач в сочетании с графическими возможностями дают возможность решать сложные задачи.

Заключение.

Первый эксперимент применения технологии показал, что в области археологии много интересных задач, которые могут решать совместно геофизики и археологи. Не следует забывать, что магнитометрия довольно точный и высокопроизводительный, сравнительно простой в исполнении. Наиболее трудоемкой частью таких работ является топографическая привязка наблюдений к местности (по всем координатам).

О результате экспериментальной интерпретации с помощью технологии, которая создана для решения прямых и обратных задач в геологии, судить археологам. Мы с большим интересом и энтузиазмом решали эту задачу.

Благодарности

Авторы благодарят соавторов пакета Д.Васильева и В.Сидорова за сотрудничество, а также Гоза И.В. за помощь в оформлении работы.

Литература

1. Аркаим (исследования и поиски). Челябинск, 1995 г.
2. Алексидзе М.А. Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии. – М.: Наука, 1987. – 336с.
3. Кочнев В.А. Адаптивные методы интерпретации сейсмических данных. – Новосибирск: Наука, 1988. – 152с.
4. Кочнев В.А. Адаптивные методы решения обратных задач геофизики. – ВЦ СО РАН, Красноярск, учебное пособие, 1993.
5. Кочнев В.А., Хвостенко В.И. Адаптивный метод решения обратных задач гравиметрии. - Геология и геофизика, №7, 1996, с.120-129.

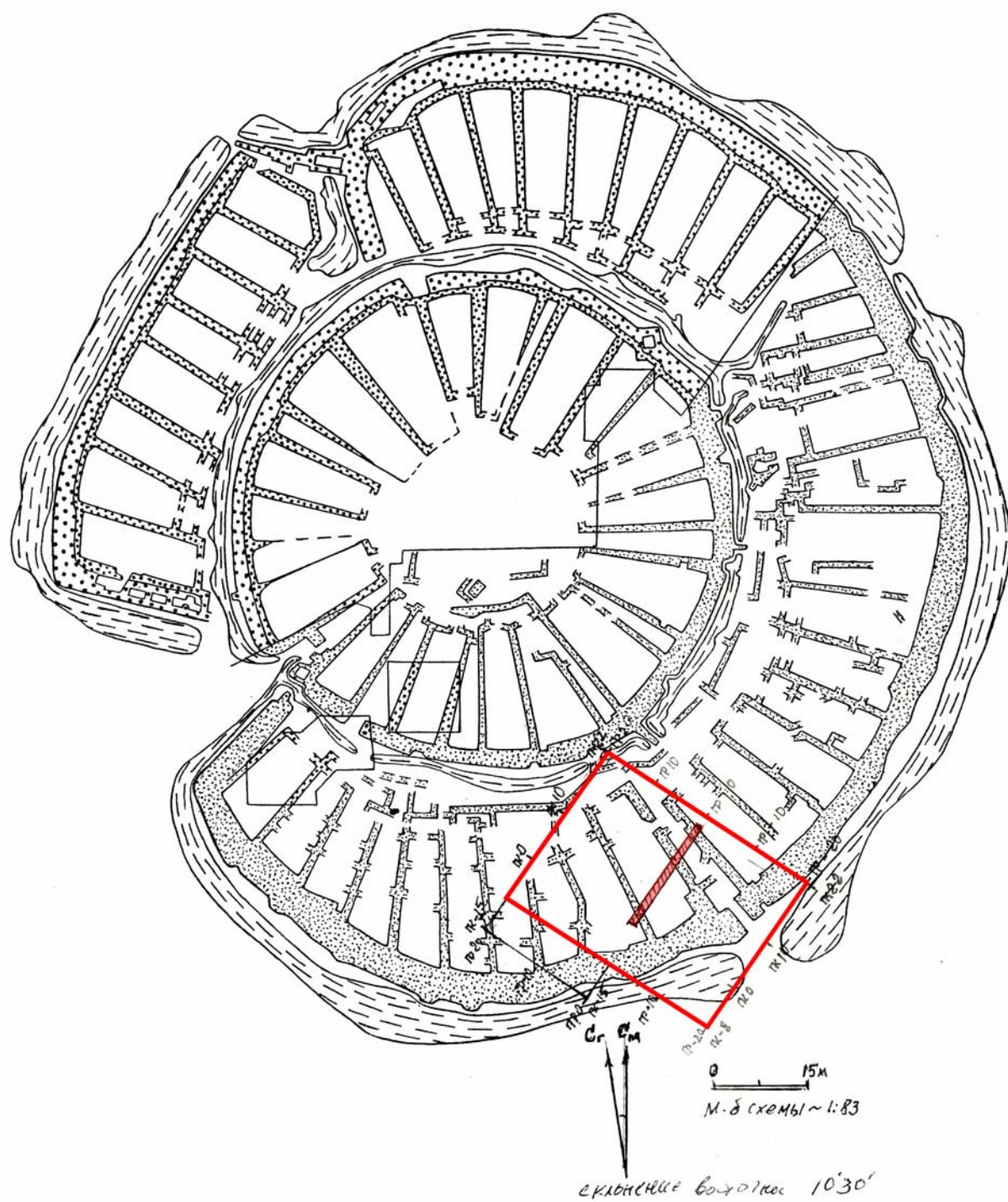


figure 1 – Archaeological site "Arkaim" (research area is shown in rectangle)

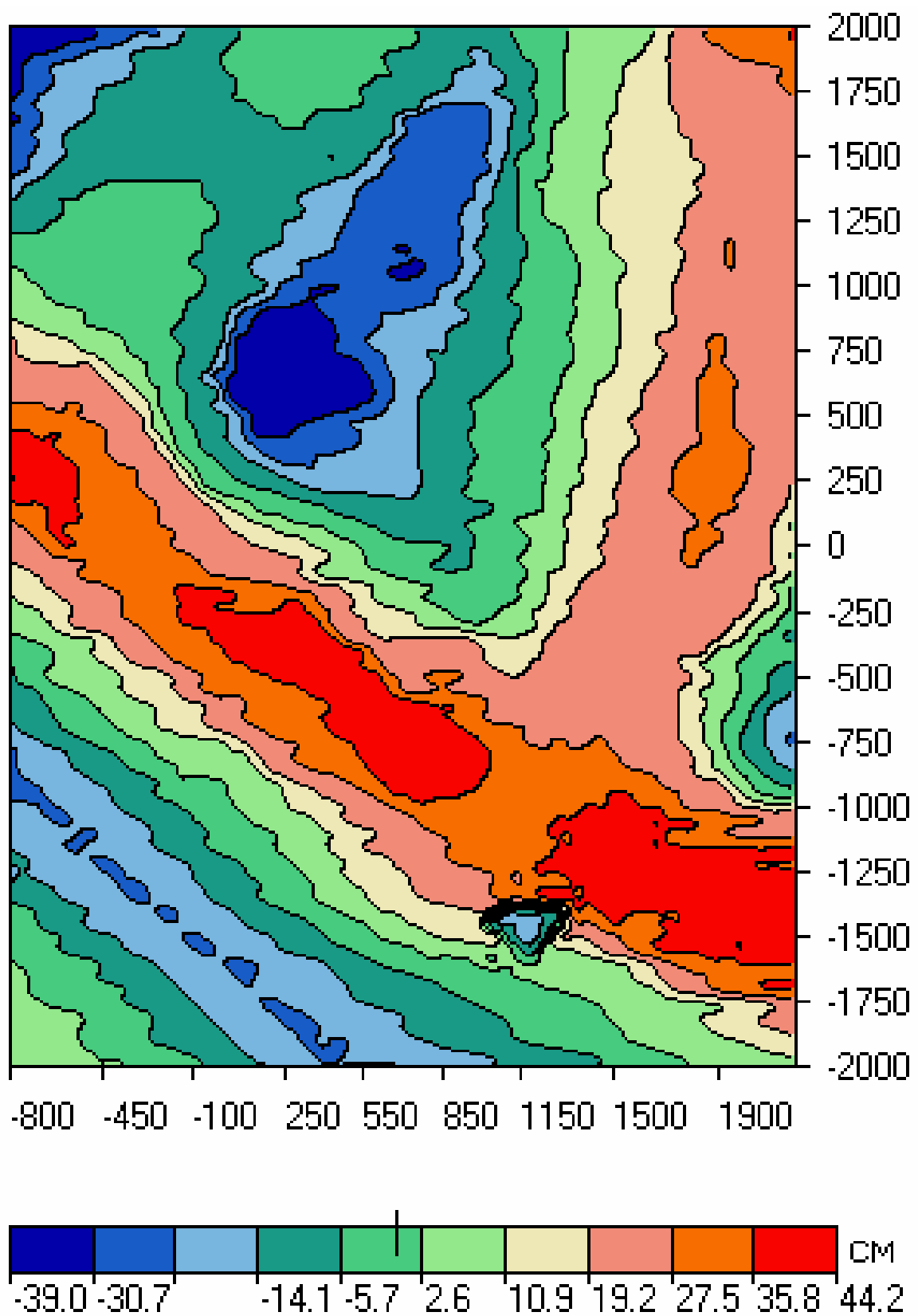


figure 2 – The relief of research area

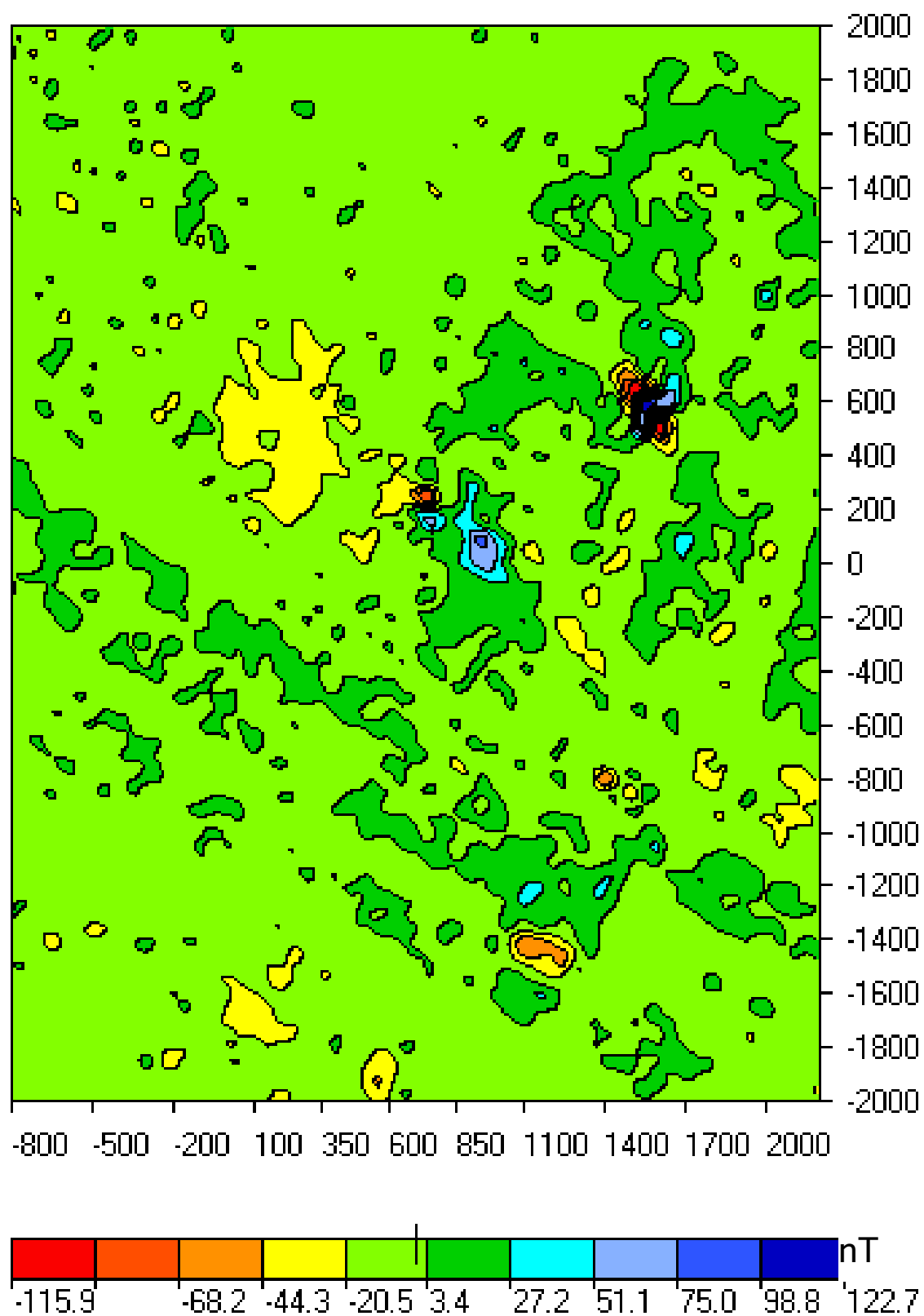


figure 3 – Initial anomalous magnetic field observed at the surface

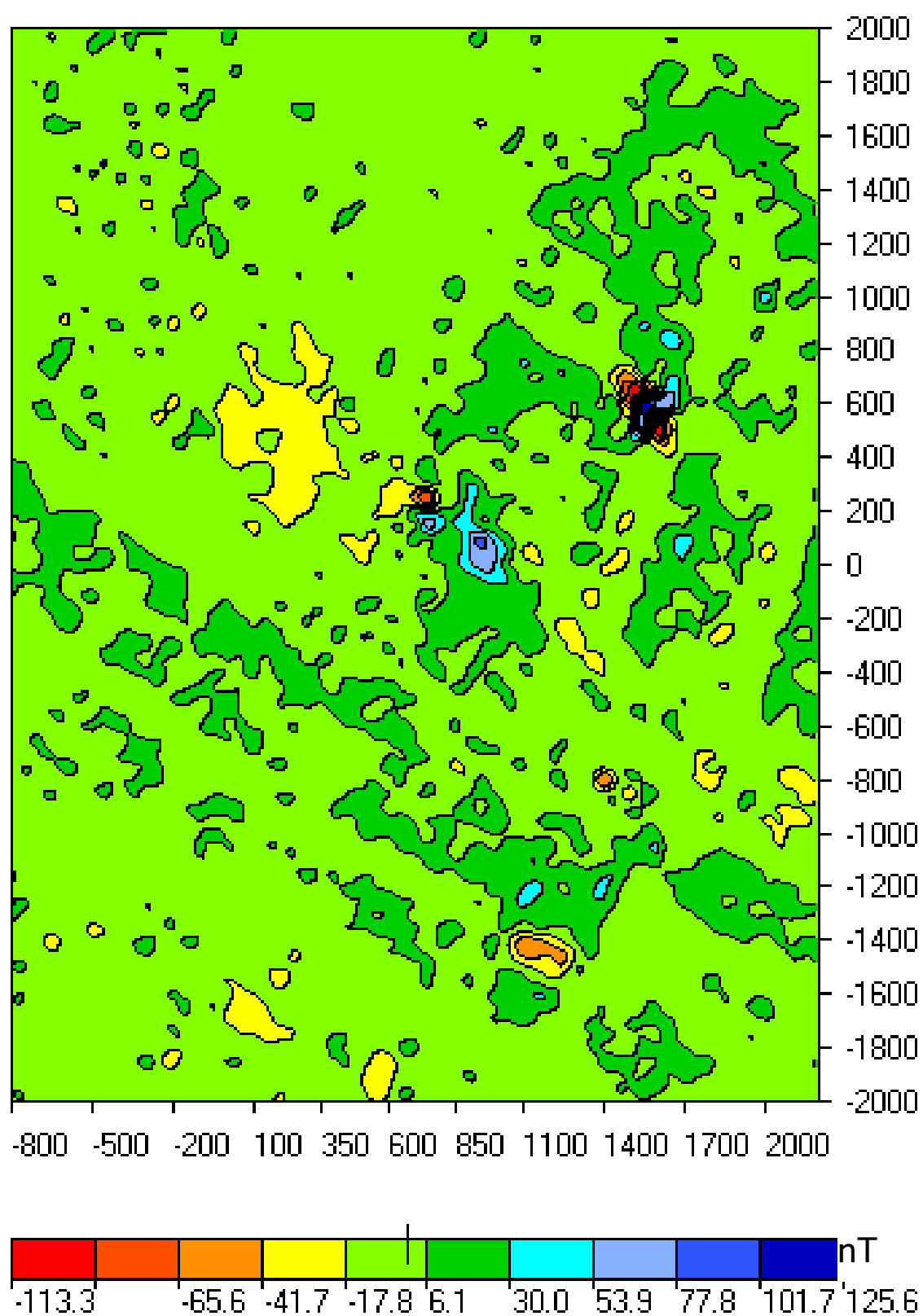


figure 4 – Modeled magnetic field

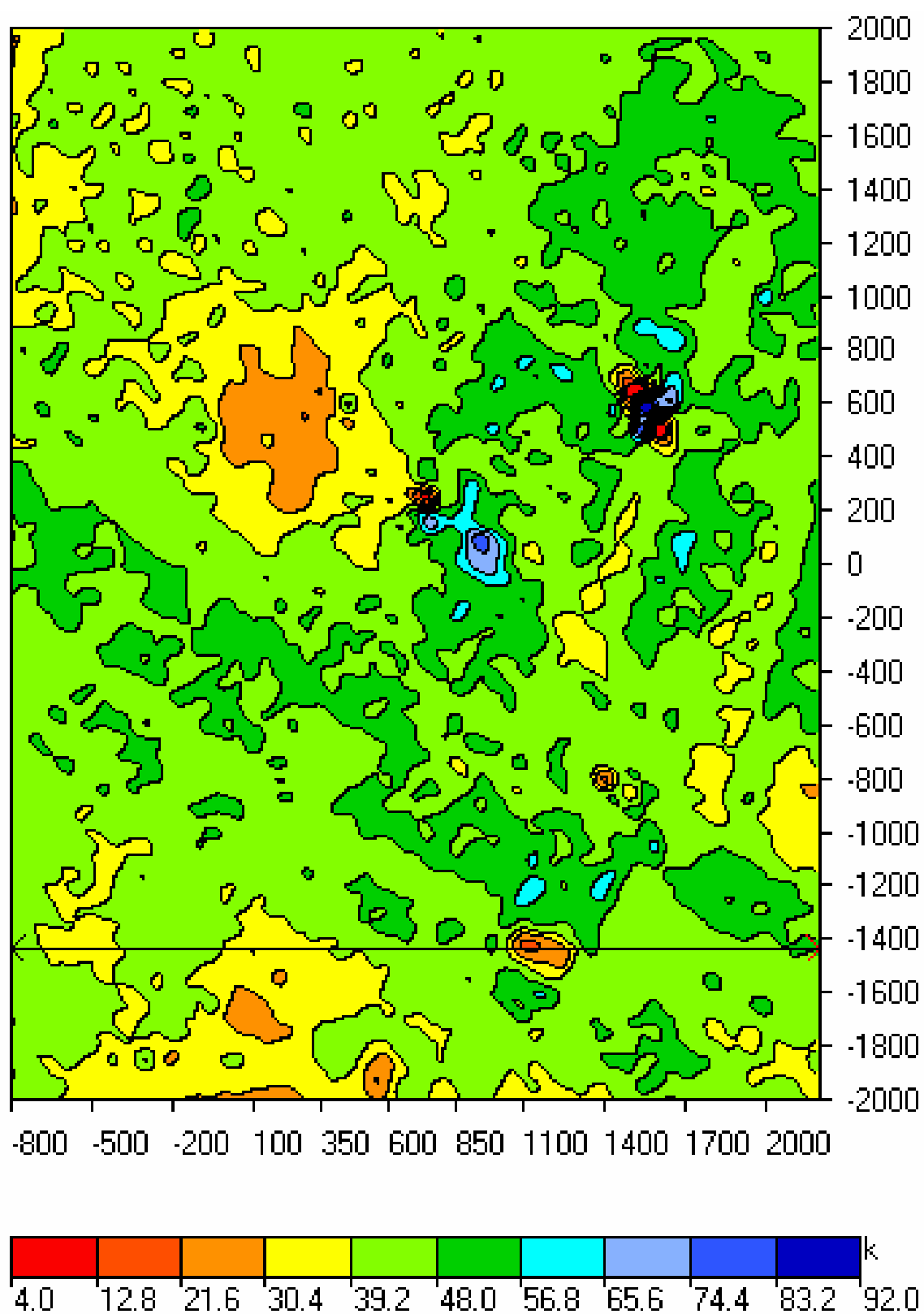


figure 5 – Magnetic susceptibilities for the first layer

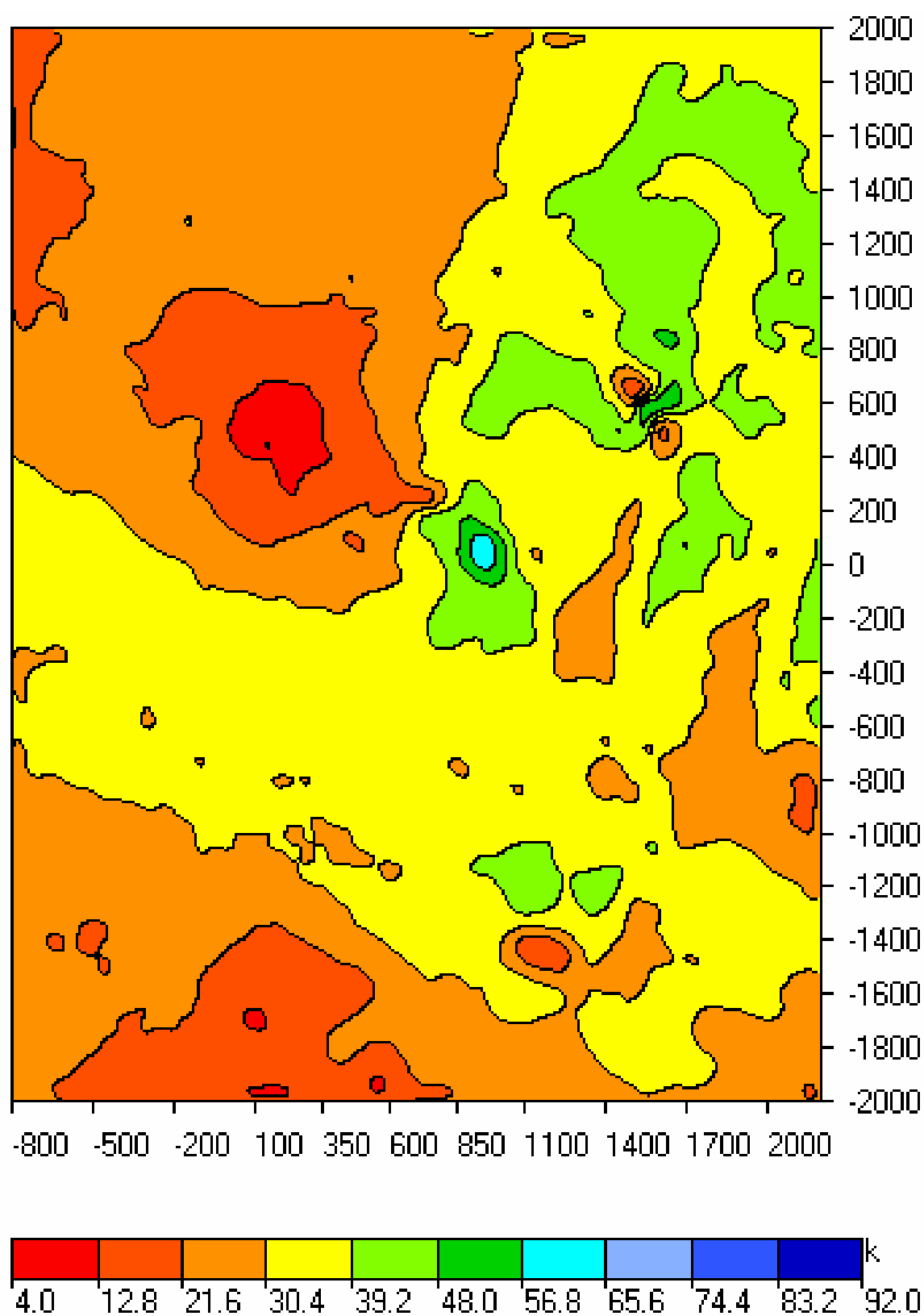


figure 6 – Magnetic susceptibilities for the second layer

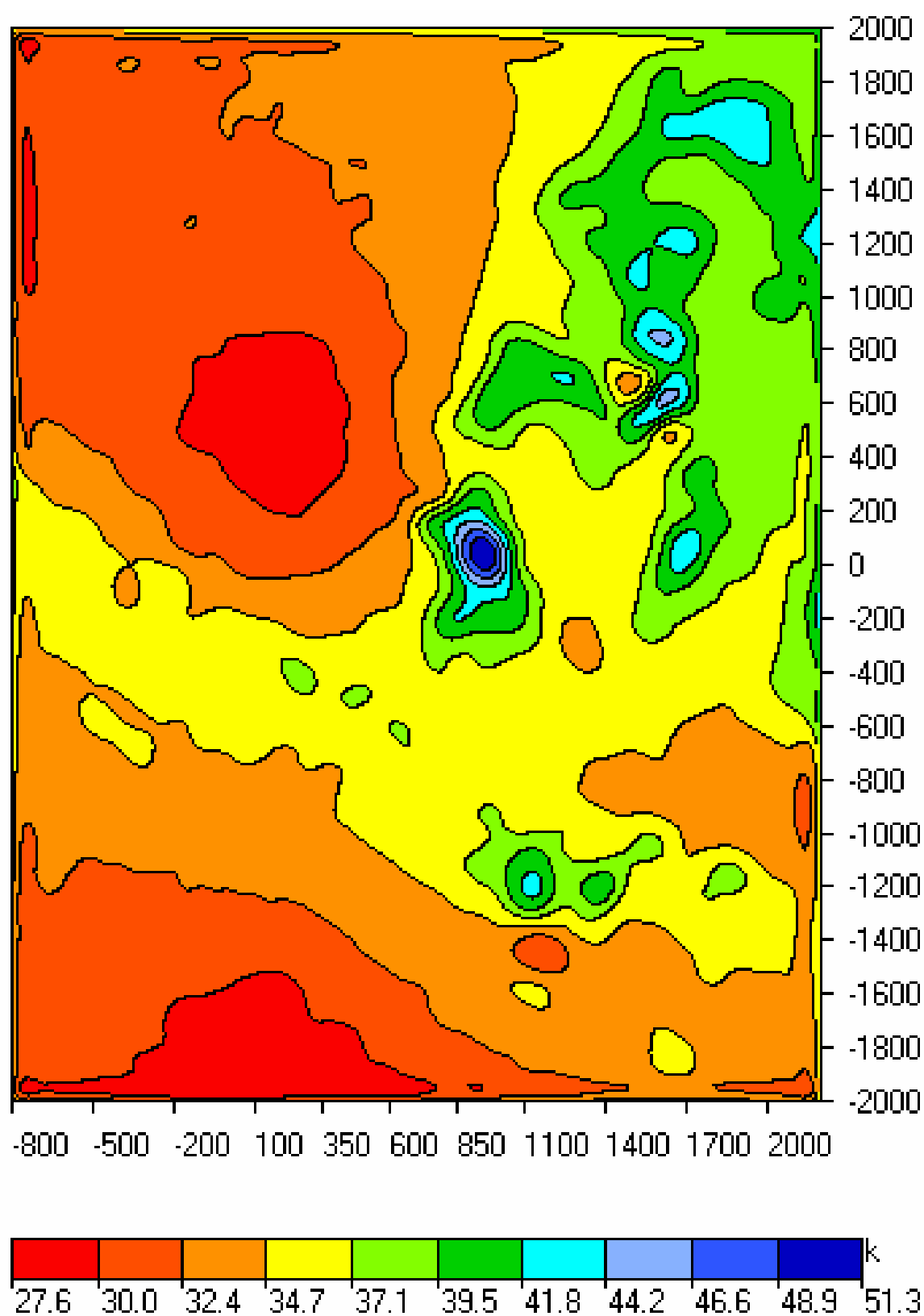


figure 7 – Magnetic susceptibilities for the third layer

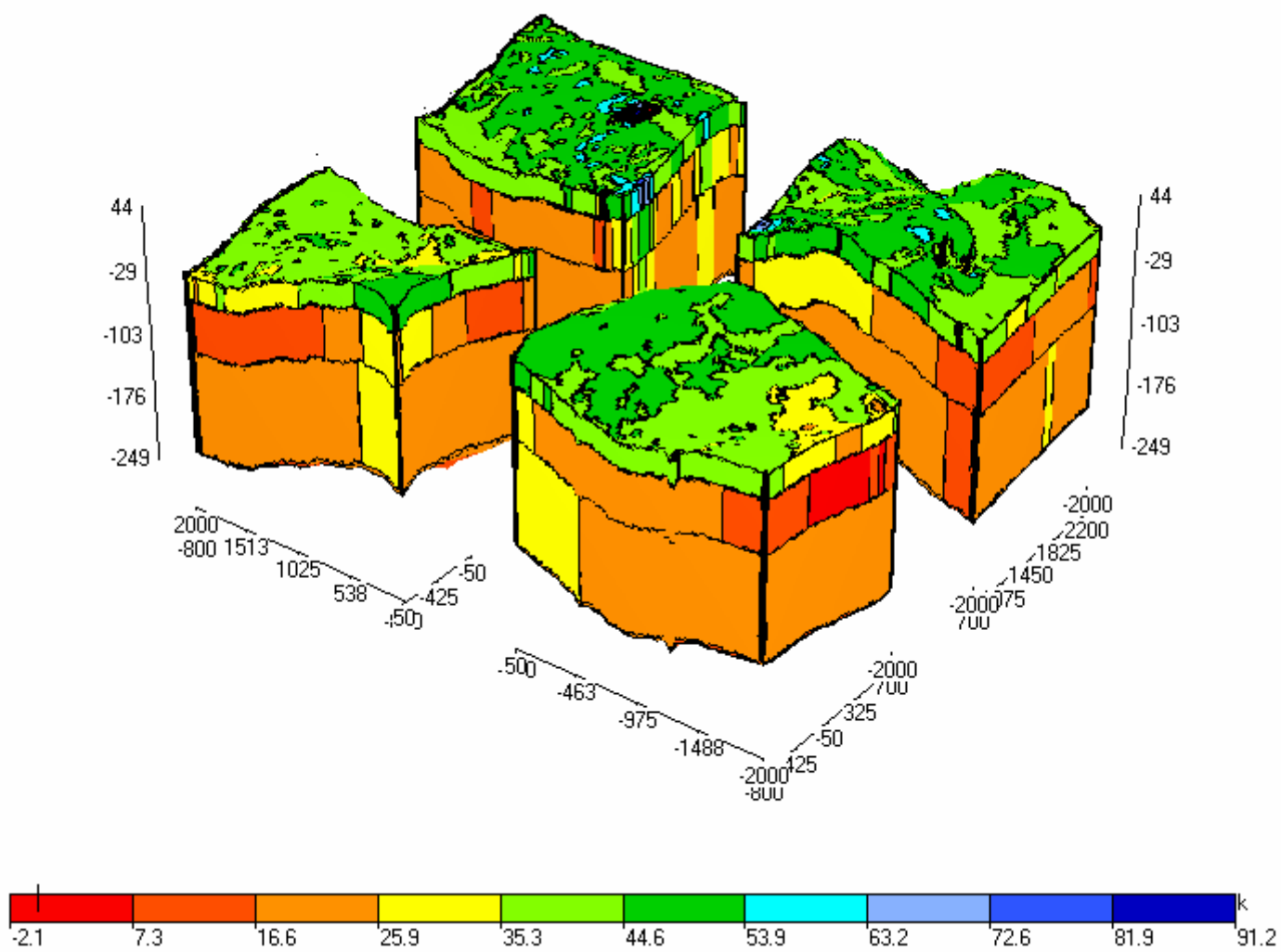


figure 8 –3D model (block variant)

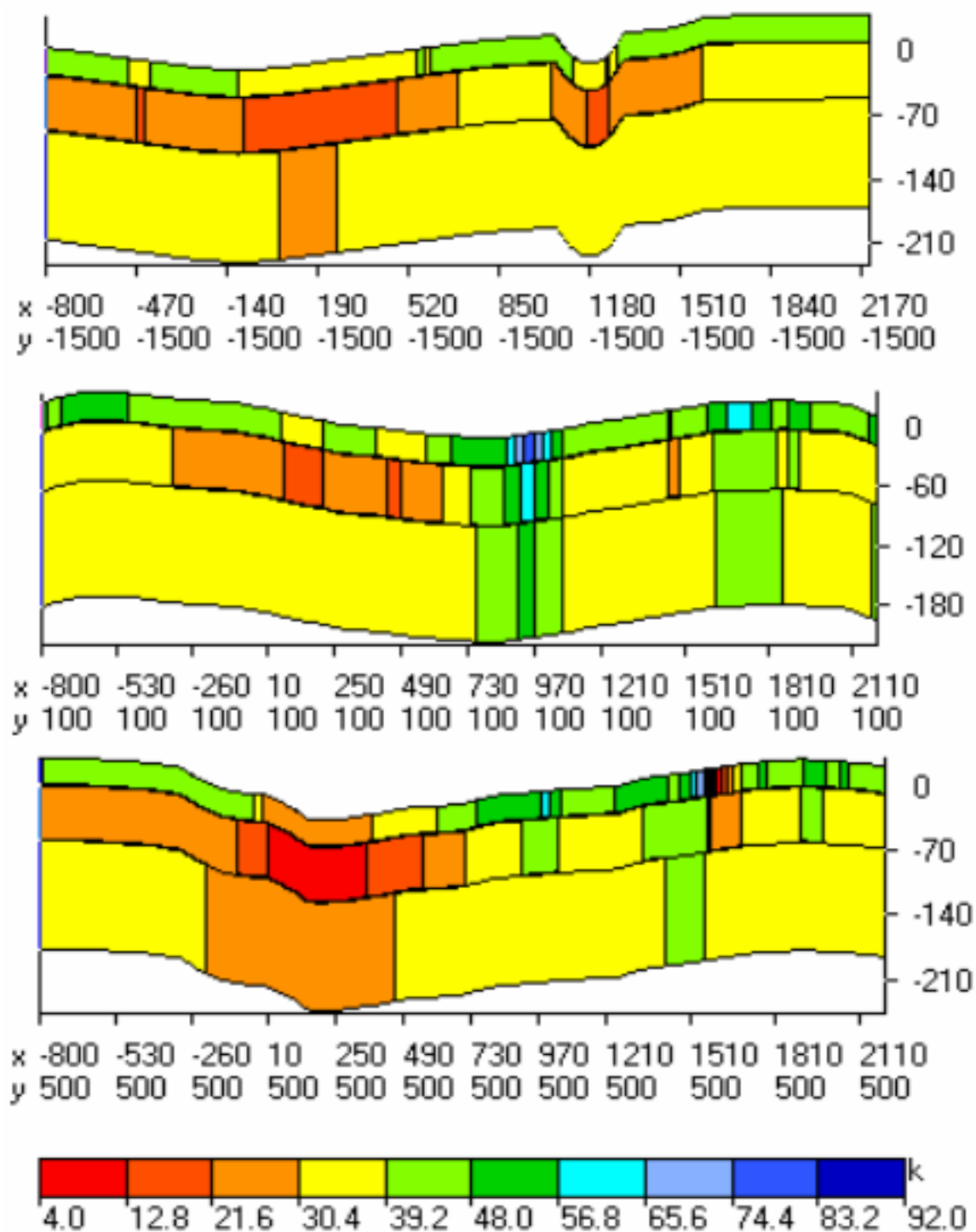


figure 9 – SW-NE sections along profiles –1500, 100 и 500

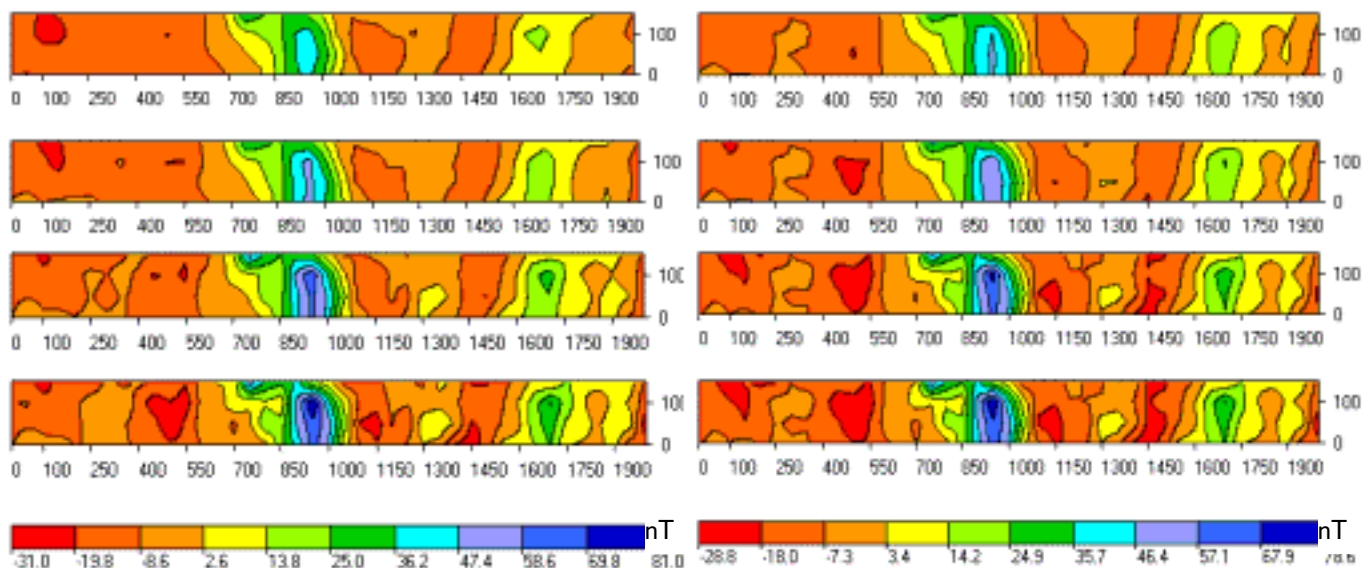


figure 11– Magnetic fields. Initial (left), modeled (right)

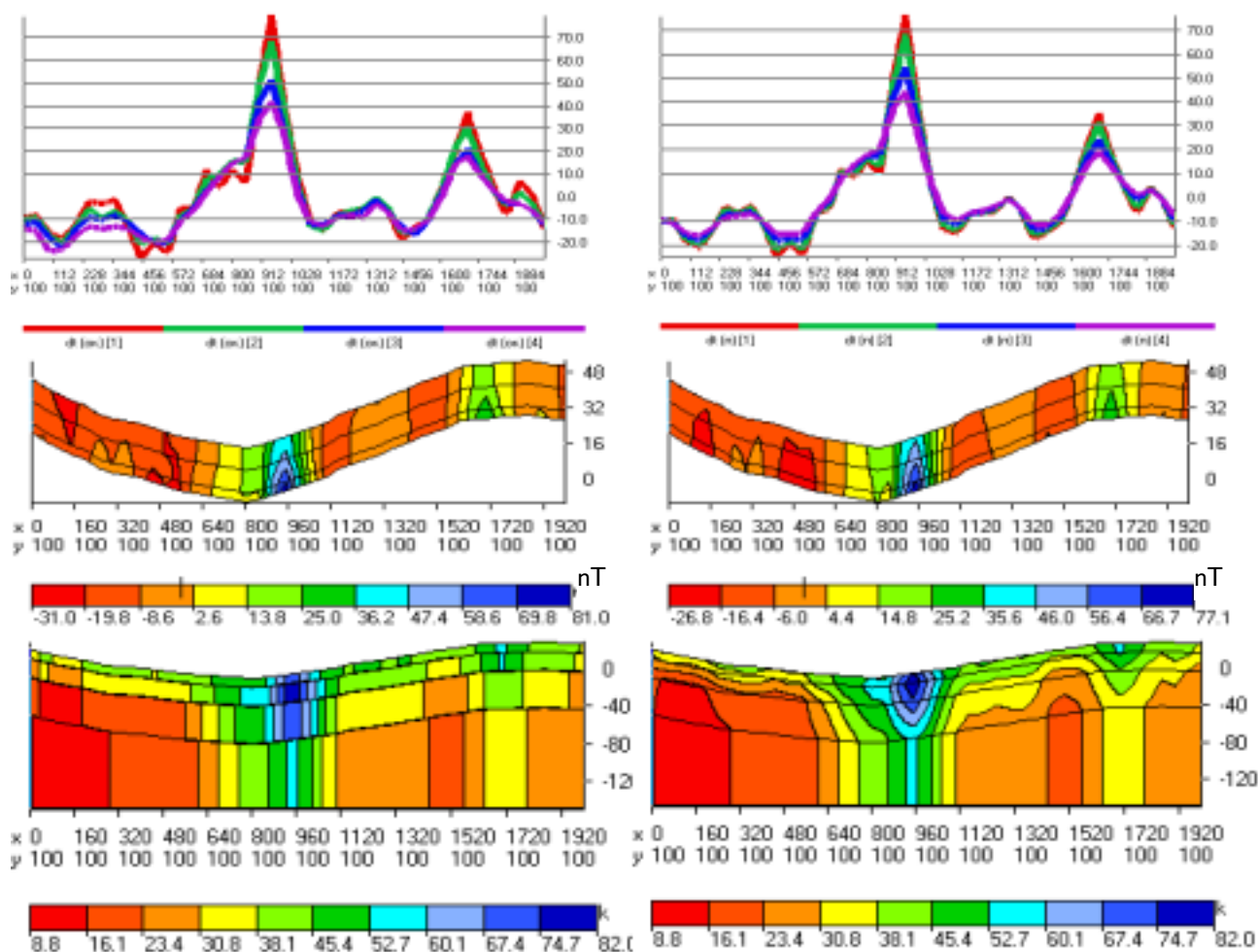


figure 12 – First row: plots, second row: fields.(left: initial, roght: modeled), third row: sections, visualized in isolines and block-style

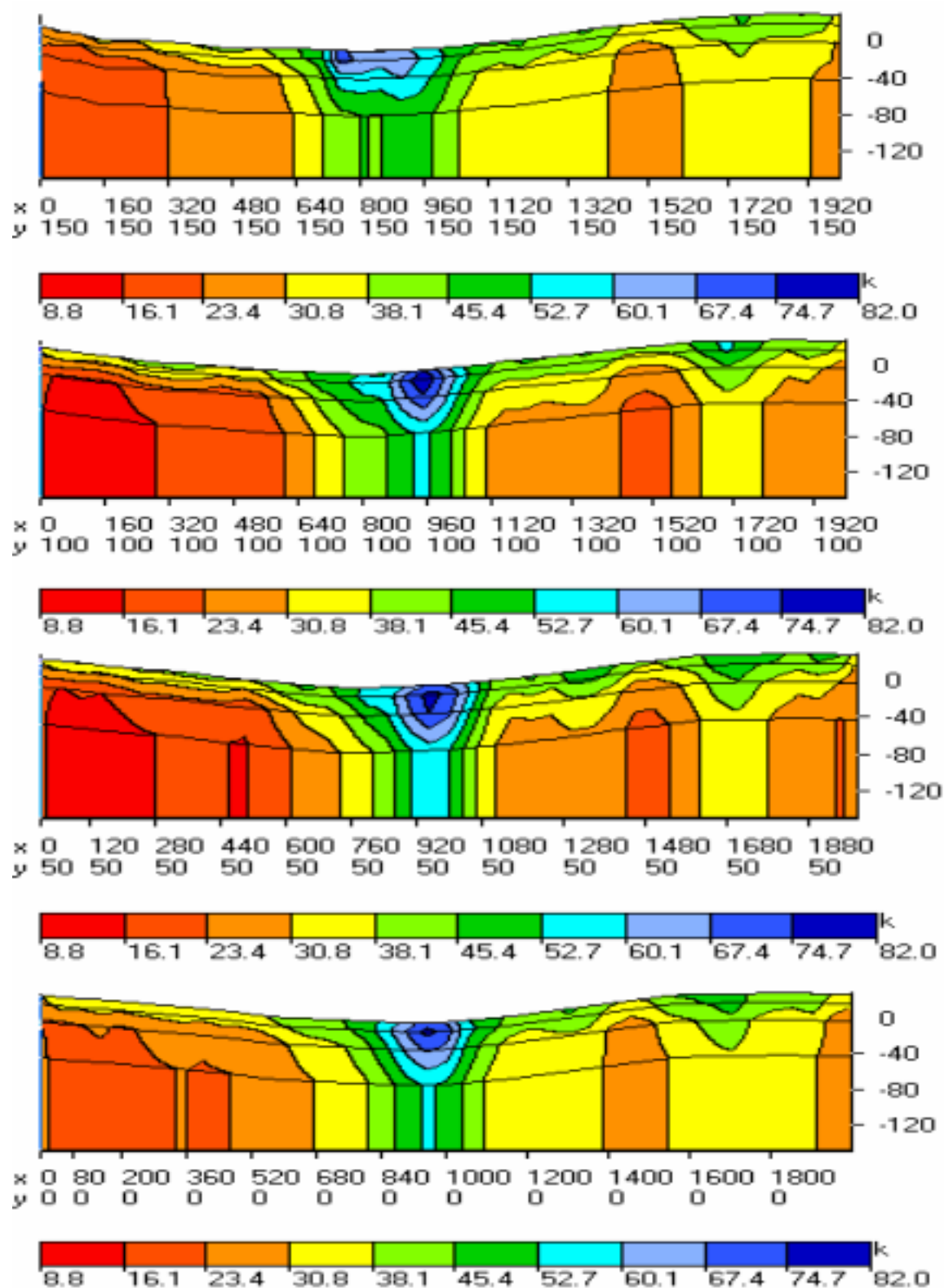


figure 13 – Magnetic susceptibilities sections 4,3,2,1

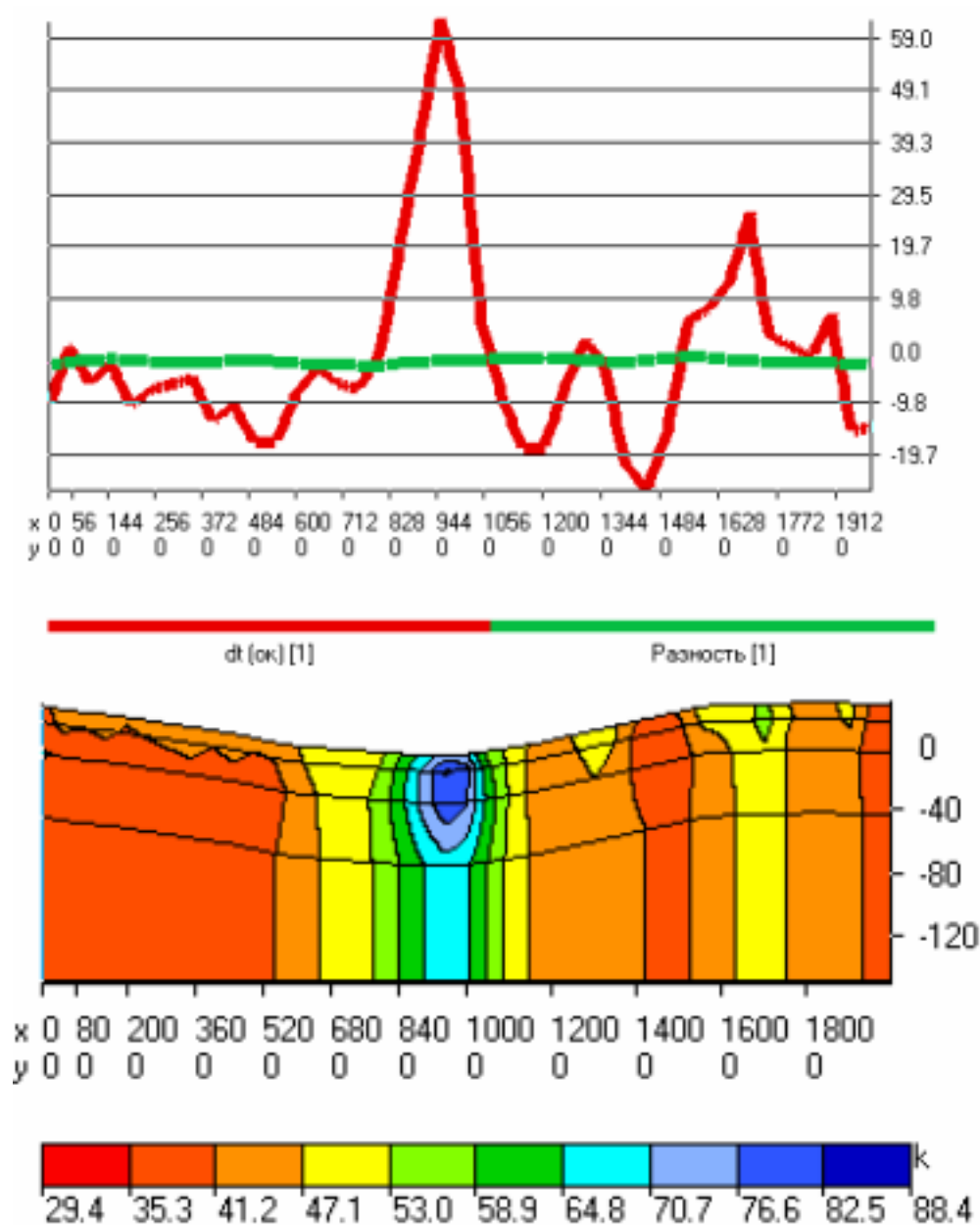


figure 14 – Plot of magnetic field along latitudinal profile 100 (dt[ок]–initial and differencial) and section obtained from one-level data.

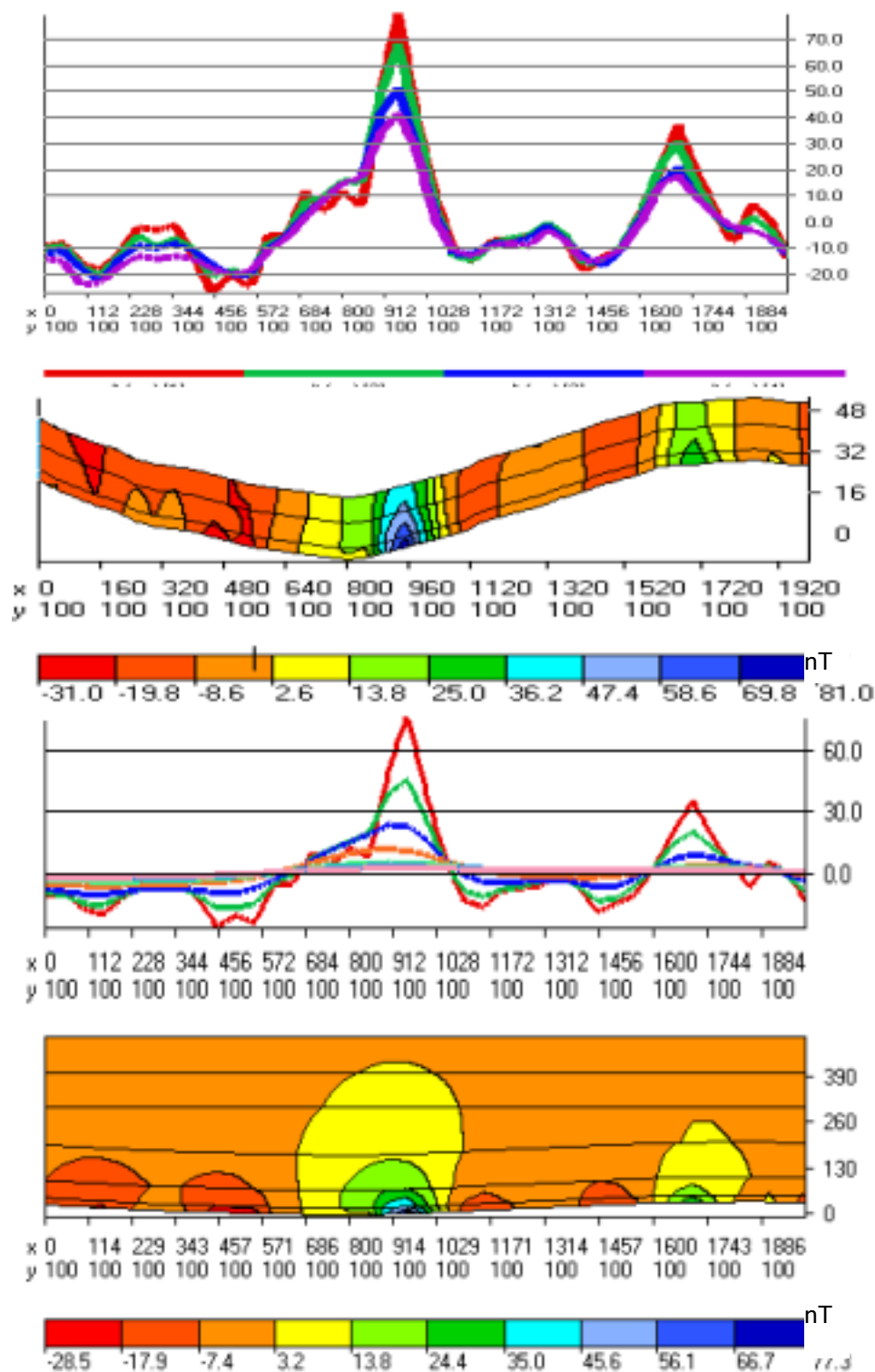


figure 15 – Magnetic fields, profile 100. From up to down: plots and section of observed field, plots and section modeled on 7 levels.