СПУТНИКОВЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ МИССИИ И МОДЕЛИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА

В. Ю. Тимофеев[1], Д. Г. Ардюков[1], А. В. Тимофеев[1], М.Г. Валитов[2], Д.Н. Голдобин[3].

[1] Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
[2] Владивосток, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
[3]ФГБОУ ВО Сибирский Государственный Университет Геосистем и Технологий
timofeevvy@ipgg.sbras.ru

VII Всероссийская конференция с международным участием
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО — СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ
ITES-2025
г. Владивосток, 22-26 сентября 2025 г.

SATELLITE GRAVIMETRIC MISSIONS AND DEEP STRUCTURE MODELS OF THE ALTAI-SAYAN REGION

V. Yu. Timofeev[1], D. G. Ardyukov[1], A. V. Timofeev[1], M. G. Valitov[2], D. N. Goldobin[3].

[1]Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
[2]Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Vladivostok,
[3]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

С появлением моделей поля силы тяжести Земли, построенных по спутниковым данным, открылись новые возможности для изучения глубинного строения земной коры и мантии. Материалы спутниковых гравиметрических миссий позволяют провести новые определения положения границы Мохоровича в западной части Монголо-Сибирской горной области. Из множества моделей на основе тестирования по данным наземным измерений методами абсолютно гравиметрии и космической геодезии выбрана модель геопотенциала EIGEN-6C4 (разложение потенциала до 2190). В исследованиях использованы гравиметрические результаты в редукциях Буге и в свободном воздухе. Значительная часть изучаемой территории (размеры - с севера на юг от 56°N до 46°N°, и с запада на восток от 80°E до 100°E)– это высокогорные районы (высоты более 3000 метров): Горный Алтай (высота до 4506 м.), Монгольский Алтай (высота до 4342 м.), Восточный Саян (высота до 3491 м.) и Хангай (высота до 3905 м.). Нами использована модель рельефа ETOPO1. В результате построена карта распределения глубин, мощность земной коры изменяется, от 40 км до 55 км. В областях активного горообразования средняя мощность коры примерно на 10-15 км больше, чем в равнинной части на юге Западной Сибири. В высокогорной части (Горный Алтай, Монгольский Алтай, Хангай) она достигает 55 км. Для межгорных долин и впадин (Тувинская котловина, Котловина Больших Озёр) глубина поверхности Мохо 45-47 км. В работе рассматриваются вопросы изостазии (равновесия) и связи с сейсмичностью региона.

Задача исследования определить пространственное представление о глубине границы коры-мантия (границы Мохо), используя результаты спутниковых гравиметрических миссий и новых наземных определений.

План работы:

1. Выбор и тестирование моделей гравитационного поля

2. Интерпретация с использованием сейсмических данных

3. Сравнение с известными определениями

4. Поле современных скоростей смещений и модель глубины поверхности Мохо

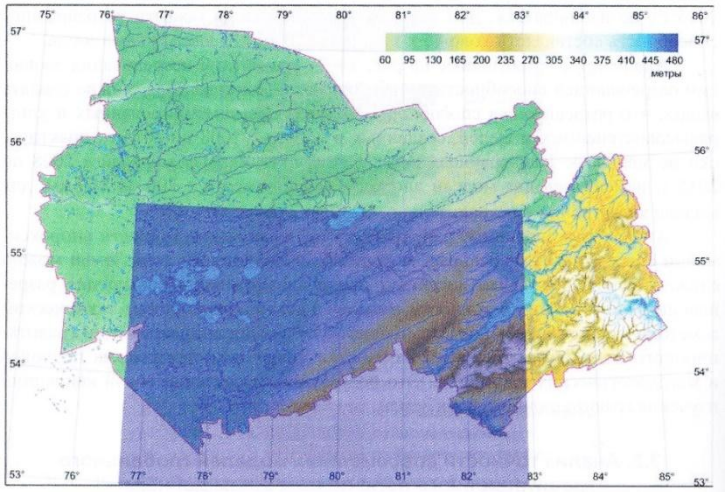
Номер по ICGEM	Модель	Год создания	Максимальная степень разложения	Исходные данные	Ссылка
167	SGG-UGM-1	2018	2159	EGM2008, S(GOCE)	Liang, W. et al., 2018 и Xu, X. et al. (2017)
161	XGM2016	2017	719	A, G, S(GOCO05s)	Pail, R. et al, 2017
154	GOCO05c	2016	720	A, G, S	Fecher, T. et al, 2016
153	GGM05C	2015	360	A, G, S(Goce), S(Grace)	Ries, J. et al, 2016
152	GECO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)	Gilardoni, M. et al, 2016
148	EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, Christoph et al, 2014
139	EIGEN-6C3stat	2014	1949	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, C. et al, 2012
162	GAO2012	2012	360	A, G, S(GOCE), S(GRACE)	Demianov, G. et al, 2012
131	EIGEN-6C2	2012	1949	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, C. et al, 2012
126	GIF48	2011	360	A, G, S(Grace)	Ries, J.C. et al, 2011
125	EIGEN-6C	2011	1420	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, C. et al, 2011
114	EIGEN-51C	2010	359	A, G, S(Champ), S(Grace)	Bruinsma, S.L. et al, 2010
109	GGM03C	2009	360	A, G, S(Grace)	Tapley, B.D. et al, 2007
105	EIGEN-5C	2008	360	A, G, S(Grace), S(Lageos)	Förste, C. et al, 2008
104	EGM2008	2008	2190	A, G, S(Grace)	Pavlis, N.K. et al, 2008

Примечание: данные таблицы 4 составлены по материалам ICGEM. Здесь *S* – данные спутниковых гравиметрических миссии; *G* – данные наземных гравиметрических измерений; *A* – данные альтиметрических измерений

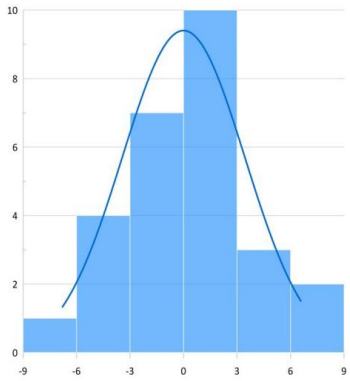
Модели выбранные для исследования

Выбор модели, сравнение с наземными данными

Пятнадцать моделей были проанализированы на основе данных наземной съёмки по Новосибирской области по 27 пунктам, которые составляют опорную гравиметрическую сеть II класса. Минимальные отклонения показала модель EIGEN-6C4, а стандартное отклонение, составило 3.4 миллигал (1 мгал = $1 \cdot 10^{-5}$ м/с^2). Модель EIGEN-6C4 в дальнейшем была использована в исследованиях.

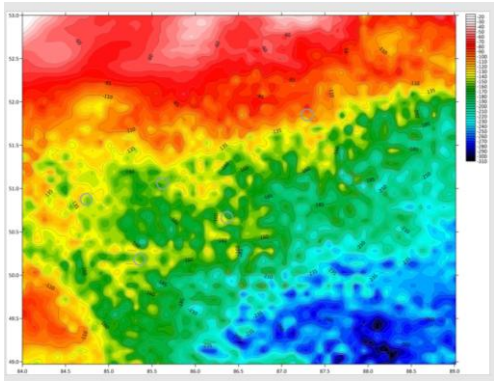


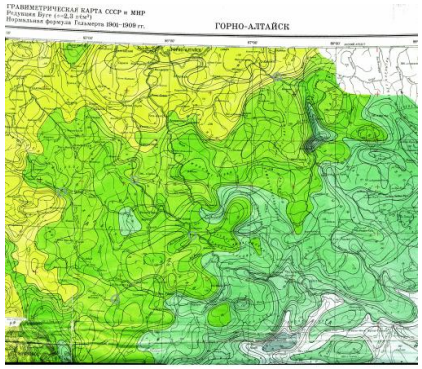
Модель	Максимальная степень модели N_0.	Δdg, мгал.
1. EIGEN-6C4	2190	3,4
2. SGG-UGM-1	2159	6,8
3. EGM2008	2190	3,5
4. GECO	2190	3,6
5. EIGEN-6c	1420	6,2
6. EIGEN-6c2	1949	3,6
7. EIGEN-6c3stat	1949	3,6
8. XGM2016	719	7,9
9. GOCO05C	720	7,2
10. GGM05C	360	7,7
11. GAO2012	360	8,4
12. GIF48	360	7,6
13. EIGEN-51c	359	8,6
14. EIGEN-5c	360	8,3
15. GGM03C	360	7,0



Гистограмма распределения ошибки для модели EIGEN-6C4, вертикальная шкала количество отсчетов определенного диапазона с шагом 3 мГала, горизонтальная шкала в мГалах, сплошная линия – нормальное распределение ошибки

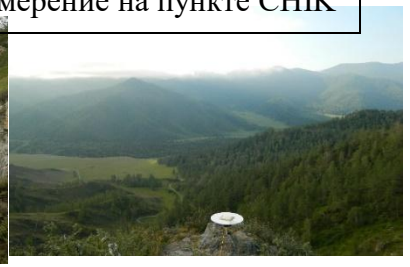
Наземные измерения и карты Буге, по спутниковым моделям и по наземной съёмки 60-х годов. Сравнение с данным космической геодезии и абсолютной гравиметрии





Измерение на гравиметрическом пункте Усть-Кан- USTK. Гравиметр ГАБЛ_П

Измерение на пункте CHIK

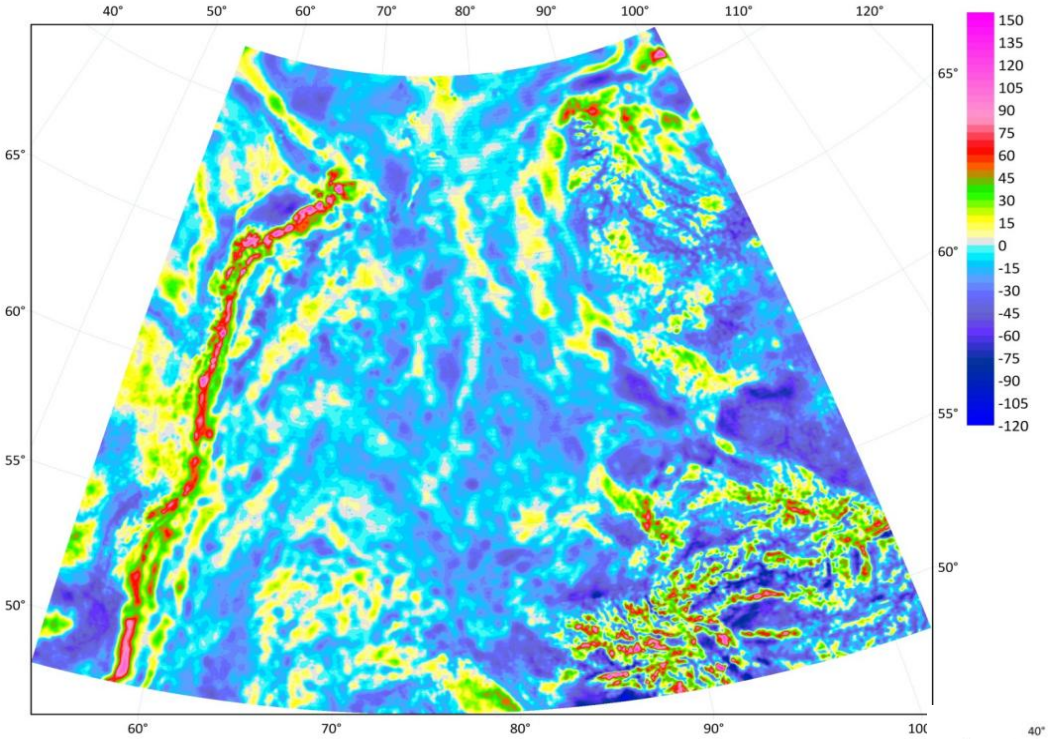


Код пункта	ϕ (°)	λ (°0	H (m)	Спутниковая модель EIGEN-6C4	Гравиметрическая карта масштаба 1:1000000
NVSK (IGS)	54.840	83.235	123	-0.9	
ARTB	51.799	87.282	460	-2.5	+22.5
SEMI	51.014	85.626	1483	-6.7	+26.4
USTK	50.939	84.769	1003	+0.3	+21.8
CHIK	50.644	86.313	1710	-1.5	+13.0
KAIT	50.145	85.464	983	+4.2	+24.5
Среднее значение с ошибкой				-1.1±1.6	+21.6±2.4

Отклонения значений силы тяжести в редукции Буге для пунктов измерений по результатам сравнения экспериментальных значений и модельных данных в миллигалах, плотность промежуточного слоя $\rho_1 = 2.3 \cdot 10^3$ кг/м^3.

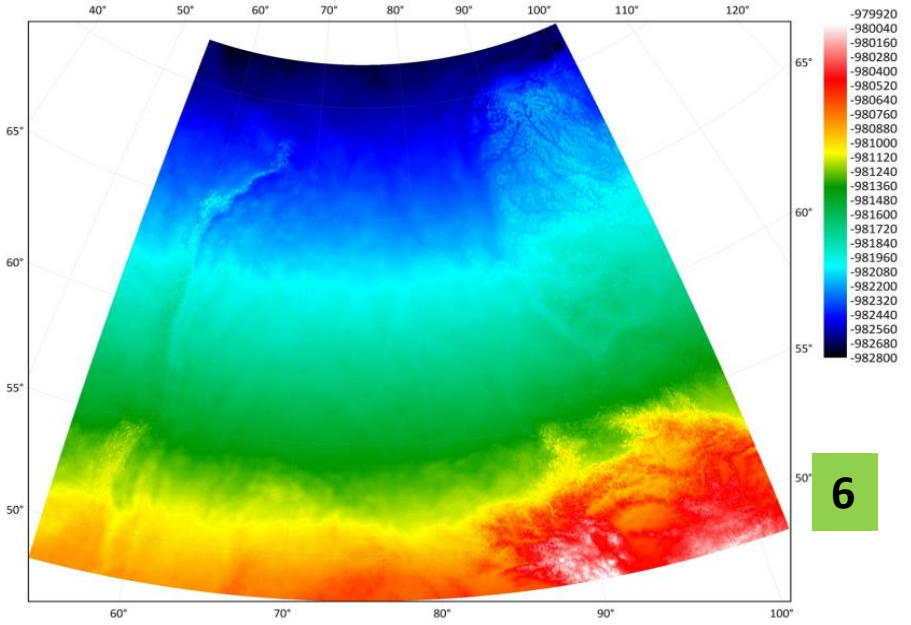
Проведено сравнение данных наземных определений в Горном Алтае, выполненных абсолютным гравиметром ГАБЛ и двухчастотными геодезическими приёмниками GPS. Анализ результатов проводился, используя поле силы тяжести в редукции Буге. Сравнение данных наземных измерений с моделью EIGEN-6C4 с моделью рельефа ETOPO1 в среднем дают отклонение -1.1 миллигала, что находится в пределах среднеквадратической ошибки 1.6 миллигала,

Модели поля – Западная Сибирь

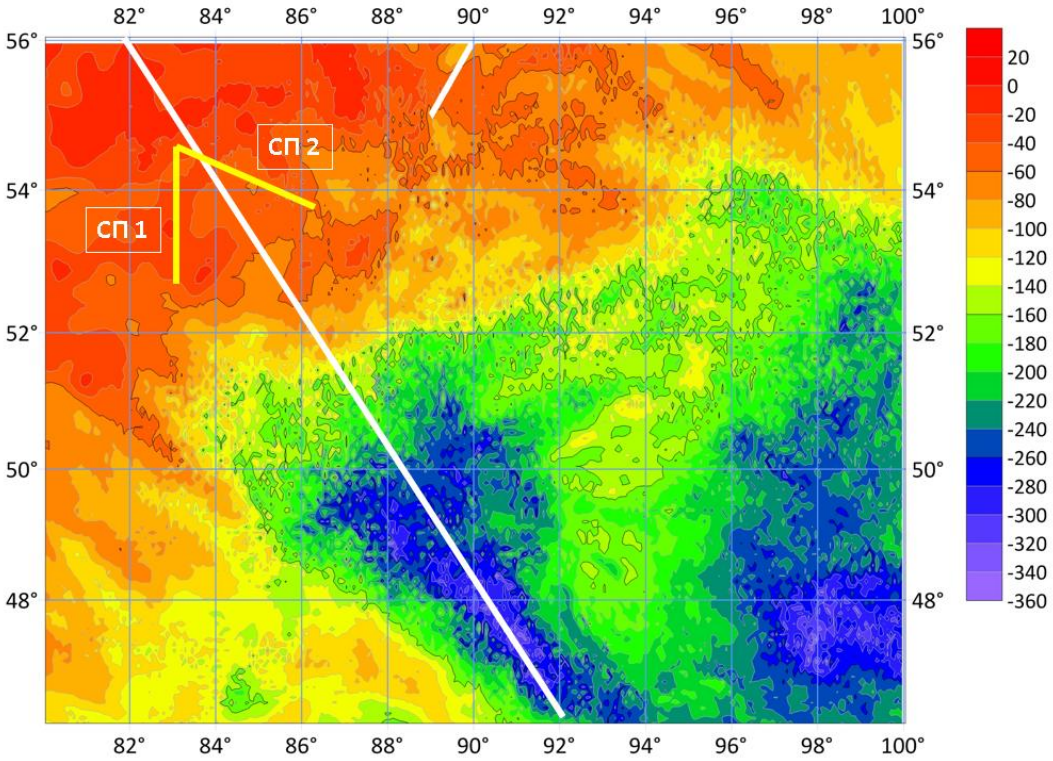


Карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе на территорию Западной Сибири по данным модели EIGEN-6C4 (мГал).

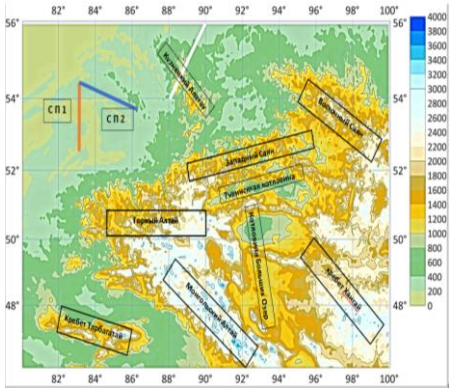
Вертикальная составляющая значения силы тяжести, полученная по модели EIGEN-6C4 с моделью рельефа ETOPO1 для территории Западной Сибири в миллигалах. Изменения значения представлены в цвете от 979920 мГал до 983800 мГал. Максимальные значения выделяются на севере территории, а минимальные на юге.



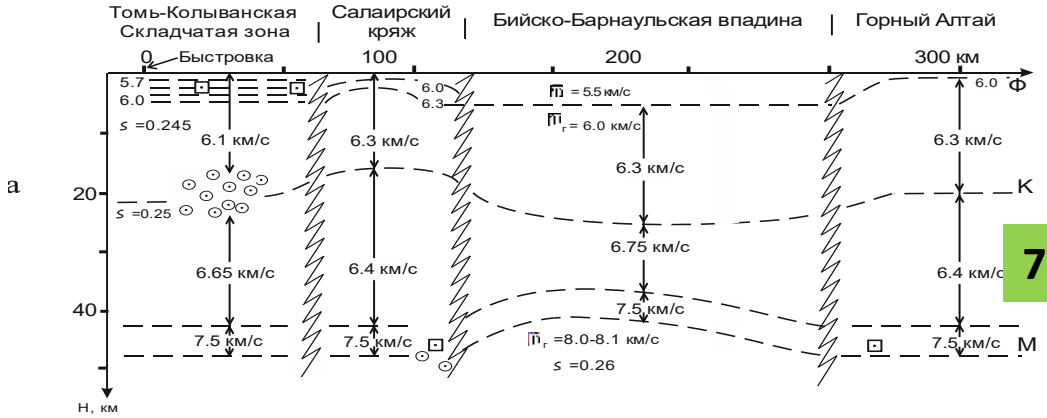
Модель аномального поля, рельеф и сейсмические данные



Карта аномалий Буге по модели EIGEN-6C4 и положение гравиметрических (белые линии) и сейсмических профилей (СП 1 и СП 2, жёлтые линии). Координаты в градусах, цветная шкала справа – в мГалах. Плотность промежуточного слоя $\rho_1 = 2.7 \cdot 10^3$ кг/м^3.

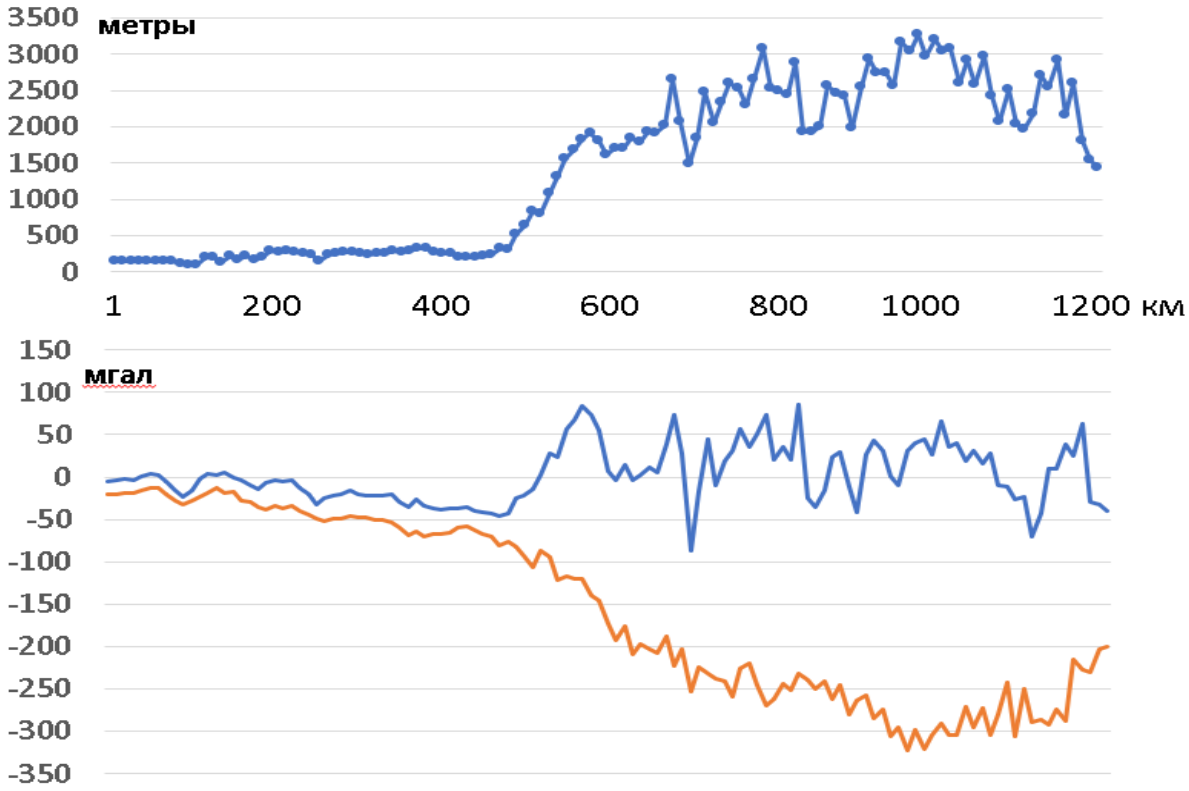


Основные формы рельефа исследуемой территории (справа – шкала высот в метрах), СП1 и СП2 – положение вибросейсмических профилей Быстровка-Алейск и Быстровка-Прокопьевск [Алексеев и др., 2004; Соловьёв и др., 2005), результаты которых использованы при построениях границ Мохо по гравиметрическим моделям

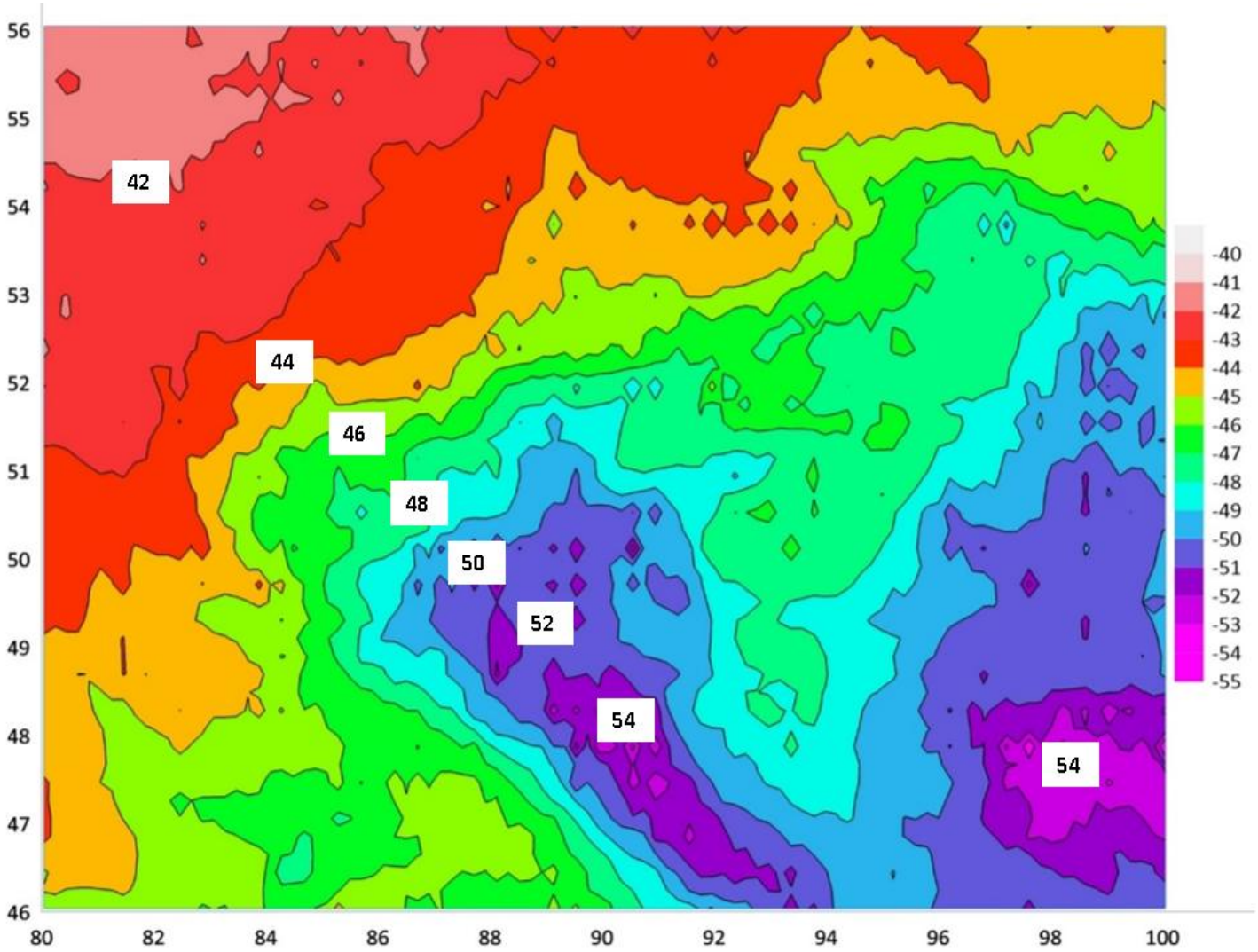


Вибросейсмический разрез по профилю Быстровка-Алейск (от Новосибирска на юг). По работам [Алексеев и др., 2004; Соловьёв и др., 2005]. Глубина в км. Показано положение границы Мохо (М) и внутрикоровых границ.

Профиль с северо-запада на юго-восток территории



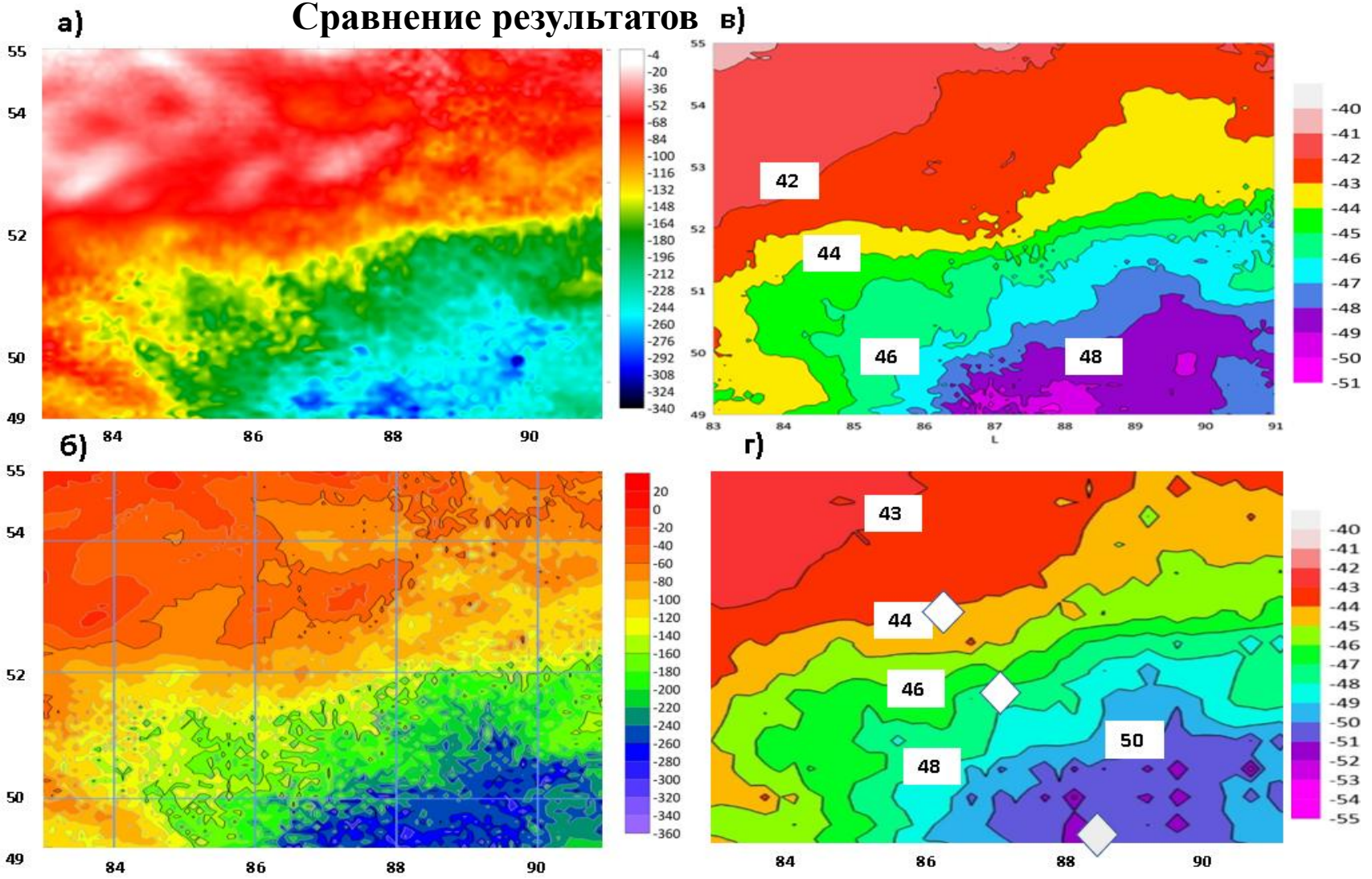
Изменение высоты в метрах (сверху вниз), гравитационные аномалии в свободном воздухе, Буге в мГал. Горизонтальная шкала в км. длина 1200 км, профиль от точки с координатами 56°N, 82°E до точки с координатами 46°N, 92°E.



Модель глубин поверхности Мохо

Карта глубин поверхности Мохо в километрах, построенная по сейсмическим и гравиметрическим данным. Цветная шкала в километрах, широта и долгота в градусах. Используем информацию о том, что на отдельных участках профилей по сейсмическим данным имеются надёжные определения слабо изменяющейся по простиранию глубины Мохо $z_0 = 42$ км. По модели EIGEN-6C4 для этих участков значение аномалии Буге составляет: - 40 мГал, для плотности земной коры $\sigma_1 = 2.7 \cdot 10^3$ кг/м^3 и для верхней мантии плотность $\sigma_2 = 3.4 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Сравнение результатов



Вариации аномалий Буге и мощности земной коры,

а) Карта аномалий Буге для выделенного участка с Рис. 10 с плотностью промежуточного слоя $2.3 \cdot 10^3$ кг/м^3,

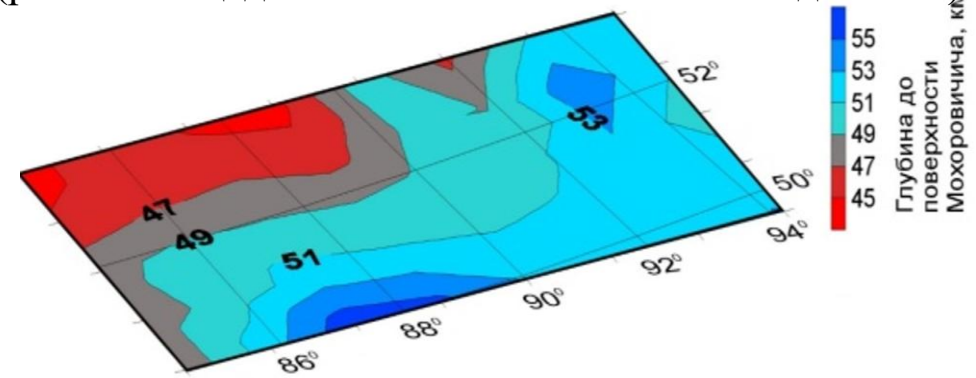
б) Карта аномалий Буге с плотностью промежуточного слоя $2.7 \cdot 10^3$ кг/м^3,

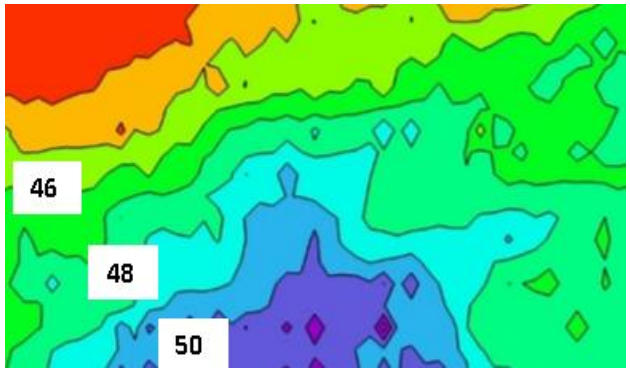
в) Глубина поверхности Мохо при параметрах $\rho_1 = 2.3 \cdot 10^3$ кг/м^3 и $\rho_2 = 3.2 \cdot 10^3$ кг/м^3,

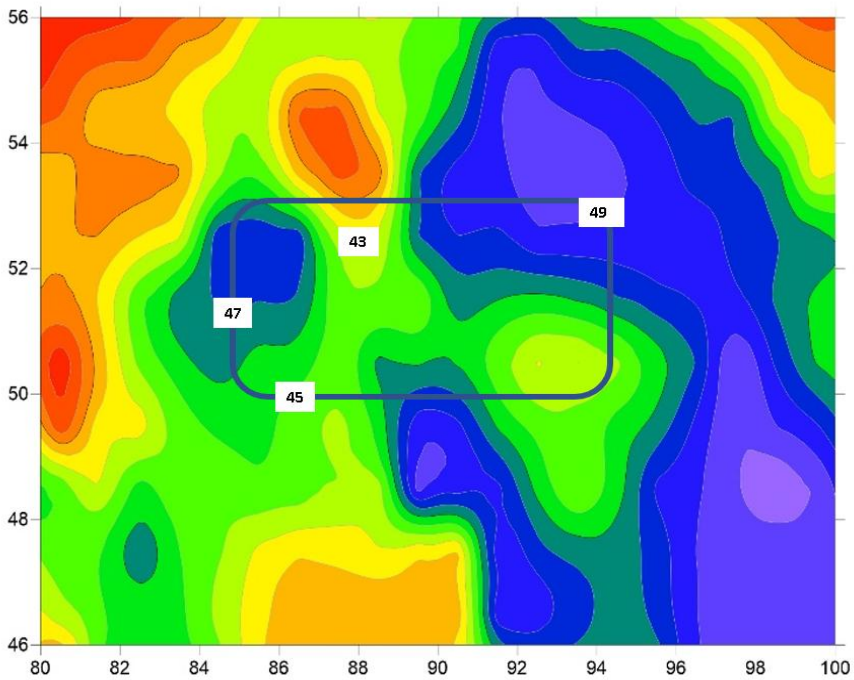
г) глубина поверхности Мохо при параметрах $\rho_1 = 2.7 \cdot 10^3$ кг/м^3 и $\rho_2 = 3.4 \cdot 10^3$ кг/м^3. Ромбами на (г) обозначены отдельные пункты сейсмического профиля МОВЗ «САЙЛЮГЕМ – ЕЛЬЦОВКА-Алтайская» (Еманов и др., 2017)

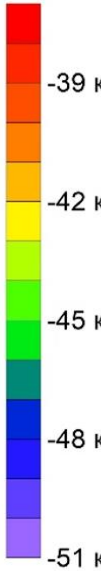
Сравнение результатов

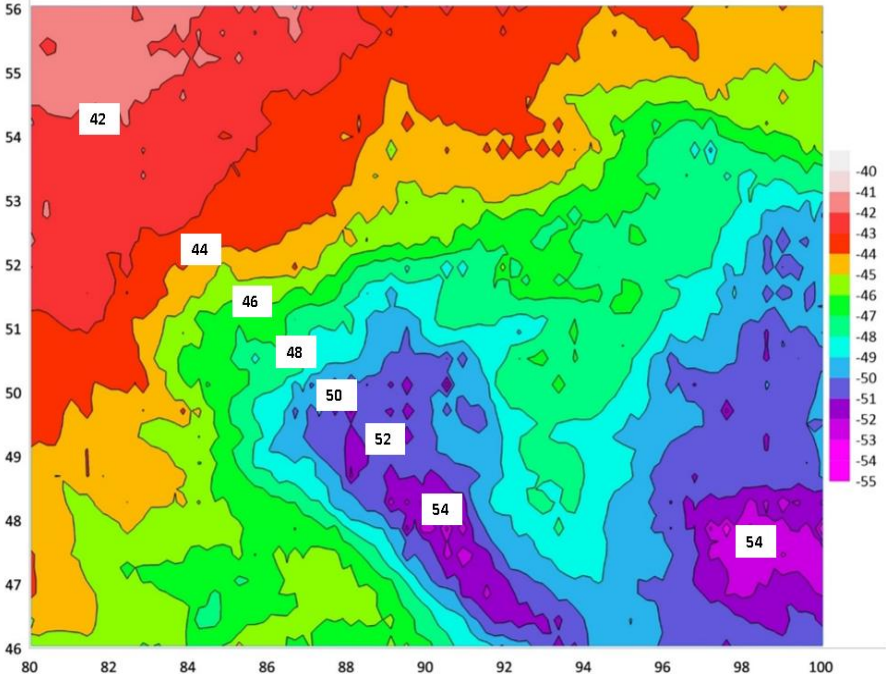
Распределение глубин по поверхности Мохоровичича в Алтае-Саянской складчатой области (район площадных сейсмологических исследований) [Соловьёв и др., 2005].





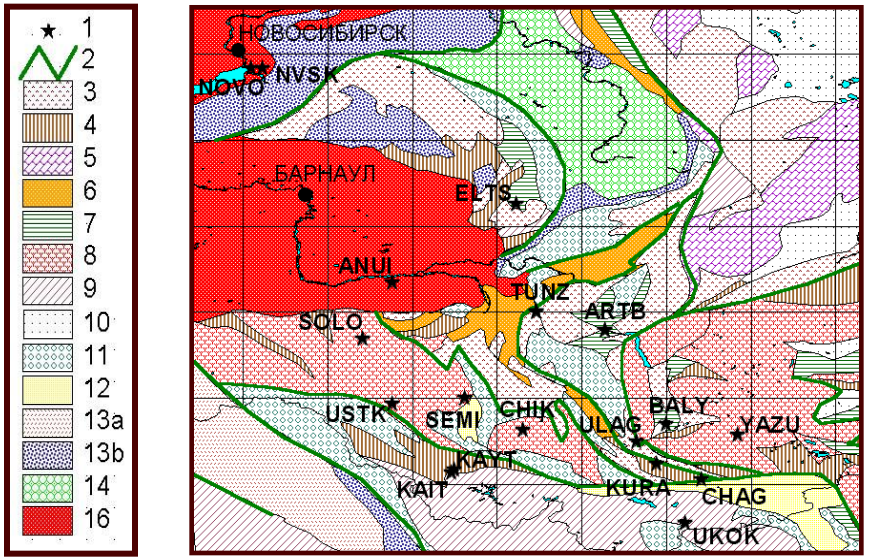




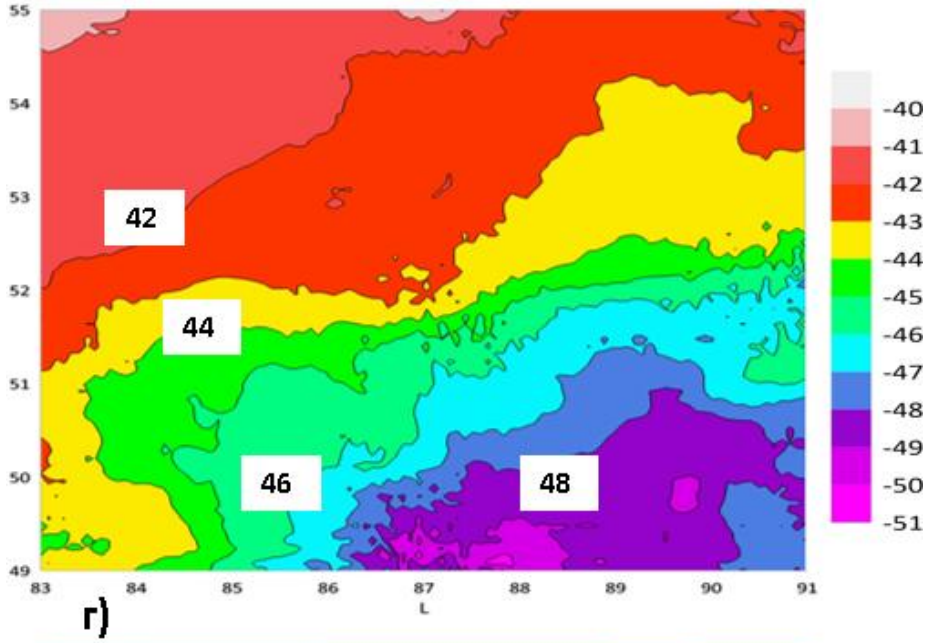


Карта глубин поверхности Мохо в км по данным модели CRUST 1.0, построенной по сейсмическим данным [Laske et al., 2013; http://igppweb.ucsd.edu//~gabi/ rem.html]. Выделен участок, с отметками изолиний глубин в км.

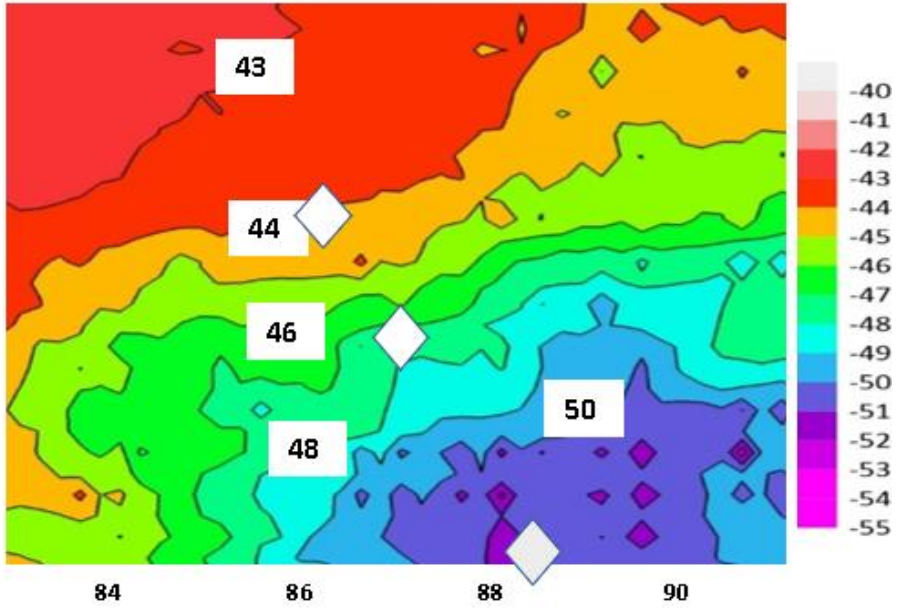
Сравнение результатов



Тектоническая схема Алтая с нанесенными на нее пунктами GPS. 1 –GPS пункты, 2 – разломы, 3 – венд-кембрийские осадочно-вулканогенные островодужные комплексы, 4 – комплексы венд-кембрийских аккреционных зон, местами с фрагментами офиолитов и высокобарических пород, 5 –блоки с венд-нижнекембрийским карбонатным чехлом, 6 – фрагменты подводных океанических поднятий с венд-нижнекембрийским кремнисто-карбонатным чехлом, 7 –области распространения верхнекембрийско-силурийских морских отложений, 8 – области распространения с верхнекембрийско-силурийских флишоидных и шельфовых отложений, 9 – венд-кембрийские флишоидные толщи Алтае-Монгольского террейна, 10 – нижнедевонские осадочно-вулканогенные рифтогенные комплексы, перекрытые в крупных впадинах средневерхнеполеозойской континентальной массой, 11 – нижне-среднедевонские осадочно-вулканогенные рифтогенные комплексы активной континентальной окраины, 12 – среднедевонские песчано-сланцевые комплексы прогибов, 13а,б и 14 – верхнедевонско-нижнекаменноугольные комплексы: 13а,б. вулканических островных дуг, 14. задуговых морских бассейнов и шельфов, 16 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты [Парфенов и др., 2003].



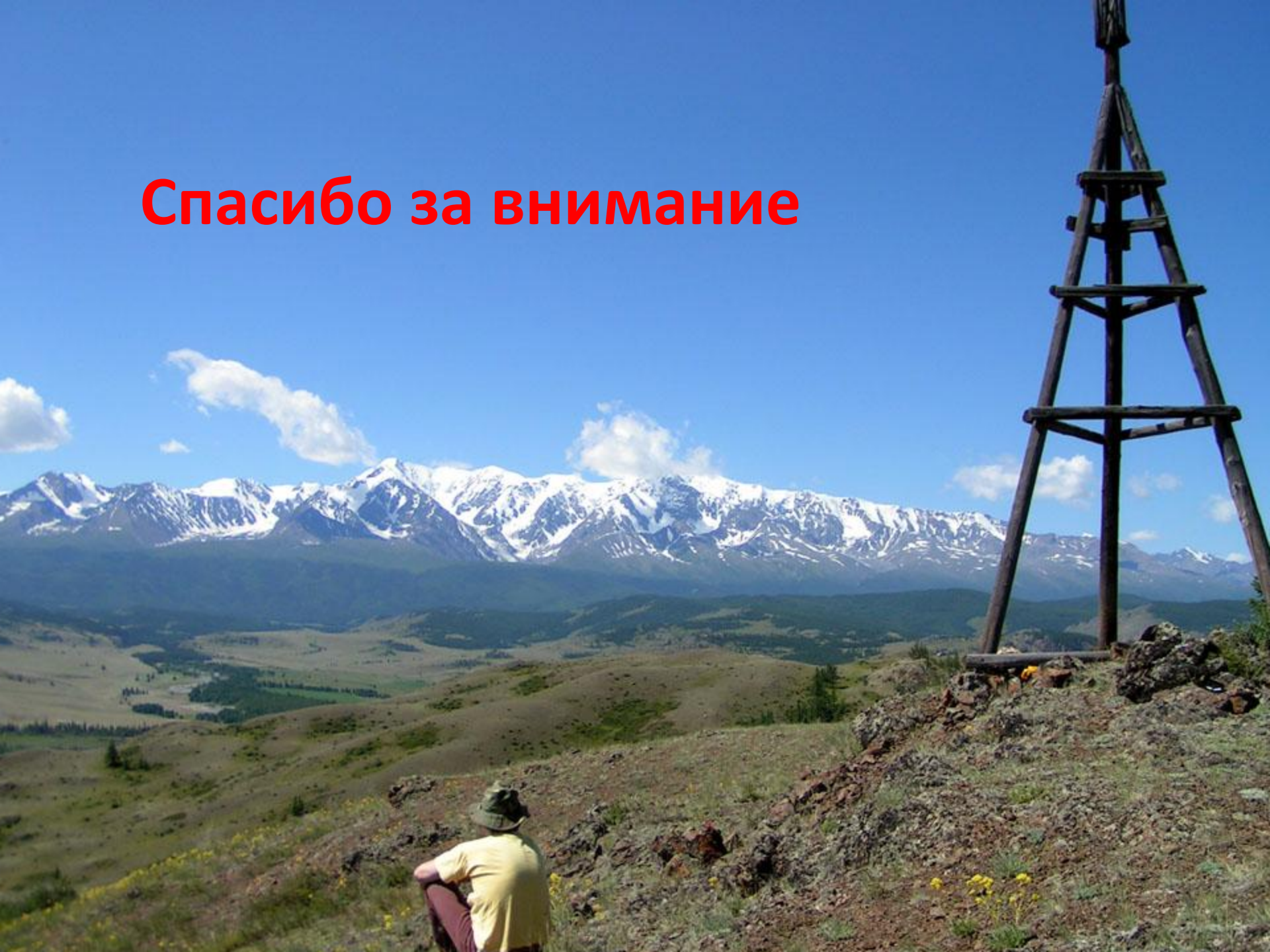
г)



Карта глубин поверхности Мохо в км, плотность промежуточного слоя $2.3 \cdot 10^3$ кг/м^3, и $2.7 \cdot 10^3$ кг/м^3

Выводы

На основе данных гравиметрических и сейсмических наземных измерений и используя гравиметрическую спутниковую модель EIGEN-6C4 построена карта распределения глубин по поверхности Мохо для территории от Алтае-Саянской области на севере до Западной Монголии на юге. Мощность земной корыизменяется, от 40 км в равнинной её части на северо-западе, до 55 км в высокогорной, на юго-востоке. В областях активного горообразования средняя мощность коры примерно на 10-15 км больше, чем в равнинной части на юге Западной Сибири, при этом под наиболее высокими горными сооружениями (Горный Алтай, Монгольский Алтай, Хангай) она достигает 55 км. Ошибку определений можно оценить в 2-3 км. Нарушение равновесия выделено для Чуйской впадины, где зарегистрировано Чуйское землетрясение 27.09.2003 (M = 7.5). Выполнено сравнение с сейсмическими данными, полученными для высокогорной части территории. Профильные результаты в Горном Алтае сохраняют отмеченные изменения с севера на юг территории, но превышают гравиметрические оценки глубины Мохо на 2-3 км. Построения с использованием сейсмологических данных не совпадают у разных авторов и отличаются от гравиметрических. Последний вывод требует дальнейших исследований.


Спасибо за внимание