

## СОВРЕМЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

*Сделан критический обзор методов получения данных о современных вертикальных движениях земной коры на побережье Черного моря. Предложен новый метод получения таких данных на основе анализа длительных рядов наблюдений за его уровнем. Метод основан на разделении постоянной величины тренда и его изменчивой части во внутритрогодном сигнале.*

Изучение вертикальных движений земной коры — одно из направлений, имеющих научное и прикладное значение. Для неотектонического этапа выделяют *новейшие*, начавшиеся в плиоцене ( $9 \pm 3$  млн. лет назад), *молодые*, охватывающие последние 10 тысяч лет, и *современные*, совершающиеся в последнее столетие. Далее речь будет идти о современных вертикальных движениях земной коры.

### Ретроспективный анализ результатов наблюдений

В настоящее время существуют несколько способов получения данных о скорости и направлении движений земной коры на побережьях. Один из них — проведение точных повторных геодезических нивелировок; другой связан с анализом данных об уровне моря. Измеряемые высоты уровня моря содержат сигнал, связанный с геодинамикой побережья, на котором расположены посты наблюдений. Этот сигнал кажущийся, так как происходит не от изменений уровня, а от поднятия или опускания берега, на котором расположен пост. В последнее время также появились космические геодезические методы и метод абсолютной гравиметрии.

Известно, что с конца 20-х годов XX века по настоящее время уровень Черного моря (как и всего Мирового океана) испытывает подъем со средней скоростью около 2,5 мм/год. Причины, приводящие к его увеличению, подробно рассмотрены в [1]. Здесь отметим только, что главным фактором повышения уровня Черного моря является эвстатический — изменение объема вод. Однако имеет место и вклад современных движений земной коры. Каковы же знаки и величины этих движений на побережье Черного моря?

В Крыму создан замкнутый нивелирный полигон, на котором установлены реперы и ежегодно проводится повторное прецизионное нивелирование. Полученные данные показали, что побережье Крыма погружается со скоростью в отдельных точках до 0,14 см/год (0,1 см/год — Черноморское, 0,12 см/год — Евпатория, 0,14 см/год — Алушта) [2]. Они же выявили, что вертикальные движения имеют микроритмы, период которых определяется несколькими годами. Основываясь на анализе данных уровня моря, скорости современных вертикальных движений земной коры

для Черного моря в [3] были оценены величинами менее  $-0,1$  см/год для всех пунктов, кроме Одессы и Поти, где они были определены, как  $-0,51$  и  $-0,62$  см/год соответственно. В [4] приведена методика определения современных вертикальных движений берегов по рядам измерений уровня и расчеты для всех пунктов наблюдений за уровнем Черного моря. По этим данным все берега испытывают современное погружение со скоростями от  $0,03$  до  $0,16$  см/год. В Одессе и Поти они возрастают до  $-0,52$  и  $-0,66$  см/год соответственно. Точность определения оценивается как  $\pm(0,03-0,04)$  см/год. Примечательно, что автор полностью игнорирует эвстатический фактор в изменении уровня, относя его на вертикальные движения земной коры. Эти данные, более детализированные, вошли в Карту современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы, изданную Международным союзом геодезии и картографии [5]. Здесь же приведена карта точности определения величин скоростей, из которой следует, что точность для побережий Черного моря составляет  $0,1$  см/год, т.е. на порядок меньше, чем заявлено в [4], и фактически соответствует самой величине изменений.

Другой подход к решению проблемы опубликован в цикле работ [6–8]. В них авторы исходят из того, что длительные ряды наблюдений за уровнем моря (Поти, Батуми, Очаков, Севастополь и Одесса) содержат две выборки. Одна из них (с начала наблюдений до 20-х годов XX столетия) показывает тенденцию к понижению уровня, а вторая (с 20-х годов XX столетия до настоящего времени) — тенденцию к повышению уровня. Первую тенденцию авторы связывают с влиянием только вертикальных движений земной коры, а вторую определяют как сумму вертикальных движений земной коры и эвстатического фактора. Исходя из этого, определив регрессионным анализом величины трендов, после несложных преобразований получают, что в Поти, Одессе и Констанце величина опускания суши составляет  $0,56$ ,  $0,43$  и  $0,35$  см/год соответственно. Во всех остальных пунктах, где установлены измерители уровня, суша поднимается со скоростью от  $0,01$  до  $0,09$  см/год (в Севастополе  $0,03$  см/год).

В основу работы [9] положена гипотеза, что регистрируемые в разных местах высоты уровня отражают общие изменения, связанные с изменением объема вод моря, и локальные, обусловленные, главным образом, вертикальными движениями участков побережья, где установлены измерители уровня. С помощью итерационной процедуры была выполнена низкочастотная фильтрация, которая позволила выделить и отфильтровать регулярный сезонный ход. Далее оценивался полиномиальный тренд исходных рядов. На втором этапе, после исключения индивидуального тренда из каждого ряда, был определен общий квазипериодический режим изменения уровня моря. Для этой цели было использовано разложение по естественным ортогональным составляющим флуктуационной части поля уровня, представленного данными в 12 пунктах. Такой подход автор оправдывает локальной неоднородностью геодинамических процессов, генерирующих некоррелированный шум в данных. Было получено, что 92 % суммарной дисперсии описывают общий компонент изменчивости, а 8 % связаны с изменчивостью уровня в отдельных районах. После ряда процедур для определения локальных изменений уровня в каждом пункте из исходных

рядов были удалены составляющие, характеризующие общие трендовые и вариационные изменения уровня. Затем для каждого ряда был определен тренд и статистически проанализированы остаточные флуктуации. После проведения всех достаточно сложных процедур в работе делаются следующие выводы:

1. Северо-западное побережье опускается со скоростью 0,1–0,16 см/год;
2. Побережья Горного Крыма и Кавказа поднимаются со скоростью 0,02–0,04 см/год;
3. Западный Крым не испытывает вертикальных движений.

Что касается Колхидской низменности (Поти), то автор делает неожиданный вывод, что в 70-х годах здесь значительное опускание сменилось подъемом со скоростью 0,19 см/год, что прямо противоречит данным наблюдений. Действительно, в это время отмечалось значительное уменьшение уровня (автор располагал данными до 1985 г.), но оно было синхронным для всех постов Черного моря, после чего уровень стал снова значительно подниматься. Все неувязки в анализе автор относит к качеству нивелировок.

В Черном море максимальная величина тренда зафиксирована в Варне и Бургасе. Здесь тренд за период 1928–1980 гг. составил 1,07 и 0,73 см/год соответственно. В [10] этот тренд связывают со значительным опусканием суши.

Таким образом, можно сказать, что определение вертикальных движений земной коры с использованием данных наблюдений за уровнем дает два взаимоисключающих результата. По одному побережья испытывают подъем [4], по другому — опускание [7], кроме этого есть и компромиссная точка зрения [10]. В одном все авторы едины: районы Поти и Одессы испытывают опускание, что трудно отрицать, поскольку повторные нивелировки дают однозначный результат.

### Методика

Оценка скорости вертикальных движений выполнена исходя из предположения о современном погружении северного побережья Черного моря (в пределах бывшего СССР), что не противоречит данным повторных нивелировок.

Рассчитаны помесечные тренды для периода 1927 — 2006 гг. в 14 пунктах побережья. Выбор этого периода обусловлен тем, что именно со второй половины 20-х годов XX века начался значимый подъем уровня.

Предположим, что изменчивая часть тренда связана с годовым ходом эвстатического фактора, а остальная часть содержит сигнал, связанный с опусканием суши. Действительно, трудно представить, что скорость вертикальных движений земной коры имеет выраженный внутригодовой ход (хотя полностью исключить это нельзя). Вычитая из общей величины углового коэффициента тренда минимальное значение годового хода, которое примем за величину скорости вертикальных движений, получим остаток, связанный с эвстатическим фактором, а также локальными факторами изменчивости.

Результаты расчетов представлены на рис. 1, где приведены помесечные угловые коэффициенты тренда для 14 пунктов северного побережья Черного моря за период 1927–2006 гг. за вычетом минимального значения в годовом ходе. Из него видно, что на всех пунктах годовой ход качественно подобен. Это может свидетельствовать о преимущественном вкладе эвстатического фактора в повышение уровня, что не противоречит выводам, сделанным в [1, 11].

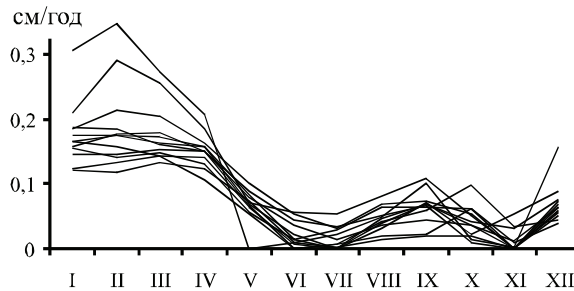


Рис. 1. Помесечные угловые коэффициенты тренда для 14 пунктов северного побережья Черного моря за период 1927–2006 гг. за вычетом минимального значения в годовом ходе

Для подтверждения этой гипотезы рассмотрим совместно помесечные угловые коэффициенты трендов для 3-х наиболее продолжительных рядов в Черном море: Одесса, Севастополь и Поти для периодов 1875–1918 гг. и 1927–2006 гг. На рис. 2 показаны помесечные угловые коэффициенты тренда за период 1875–1918 гг. для Одессы (линия с ромбом), Севастополя (линия с треугольником) и Поти (линия с квадратом). Из него видно, что в отличие от периода 1927–2006 гг. (см. рис. 1), выраженного синхронного внутригодового хода не отмечается, хотя и присутствует относительно небольшая внутригодовая изменчивость величины угловых коэффициентов трендов. Возможно, она связана с межгодовой изменчивостью водного баланса, которая не имела однонаправленных тенденций, и суперпозиция которых дает некую величину изменчивости.

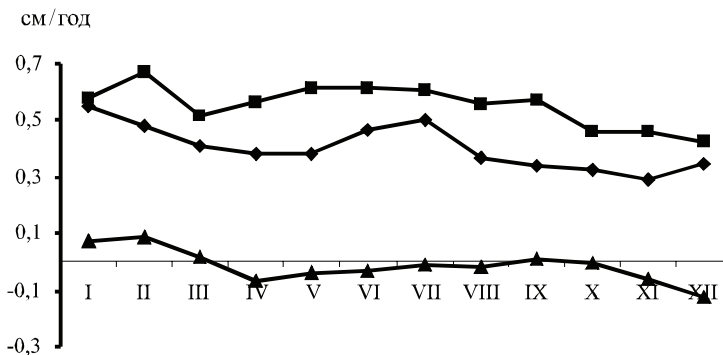


Рис. 2. Помесечные угловые коэффициенты тренда за период 1875–1918 гг. для Одессы (линия с ромбом), Севастополя (линия с треугольником) и Поти (линия с квадратом)

## Результаты

Выполненные таким образом оценки скорости вертикальных движений земной коры для периода 1927 — 1990 гг. дают величины, приведенные в таблице.

Из неё видно, что повсюду, за исключением района Одессы и Колхидской низменности, скорости вертикальных движений невелики и варьируют вокруг величины 0,1 см/год. Полученные величины близки к значениям, полученным прецизионными нивелировками для побережья Крыма [2].

### Расчетные скорости вертикальных движений земной коры для северного побережья Черного моря

Пункт	Скорость вертикальных движений земной коры (см/год)
Одесса	0,36
Очаков	0,21
Хорлы	0,10
Черноморское	0,10
Евпатория	0,16
Севастополь	0,11
Ялта	0,15
Феодосия	0,08
Анапа	0,09
Новороссийск	0,11
Туапсе	0,08
Сухуми	0,02
Поти	0,41
Батуми	0,17

### Перспективы в изучении вертикальных движений земной коры

К новым методам, прежде всего, необходимо отнести использование системы глобального спутникового позиционирования (GPS). Достигнутая к настоящему времени с ее помощью точность определения вертикальных движений составляет 1 мм/год на ряде длиной порядка 10 лет [12]. Для сравнения, измерения на стандартных мареографах дают стандартную ошибку определения тренда примерно 0,5 мм/год на ряде в 30–40 лет.

Другой современный способ — абсолютная гравиметрия (определение ускорения силы тяжести в вакууме). Он базируется на представлении о том, что согласно закону Ньютона изменение вертикального положения земной поверхности в 1 см эквивалентно изменению силы тяжести в  $3 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ , или 3 микрогала. Использование методик измерения силы тяжести с применением гелий-неоновых лазеров нового поколения и атомных рубидиевых часов позволило достигнуть точности определения в 3–4 микрогала [13]. Таким образом, оба способа имеют практически эквивалентную точность. Нет сомнений в том, что точность определения в будущем будет возрастать.

По программе MedGloss (Mediterranean Global Sea Level Observing System) предполагается в добавление к уже установленным мареографам нового поколения на постах Кацивели, Туапсе, Бургас и Констанца развертывание подсистем для определения вертикальных движений. Планируется, что на каждой станции они должны включать дополнительный репер, ресивер GPS и абсолютный гравиметр, что позволит существенно улучшить точность определения современных вертикальных движений побережья Черного моря.

1. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. НАН Украины, Морской гидрофизический институт. Севастополь, 2006, с 210.
2. Багрова Л.А., Боков В.А., Багров Н.В. География Крыма. — Киев: Лыбидь, 2001. — 304 с.
3. Каталог наблюдений над уровнем на Черном и Азовском морях. — Севастополь, 1990. — 268 с.
4. Победоносцев С.В. Современные вертикальные движения побережий морей, омывающих Европейскую территорию СССР // Океанология. — 1972. — т. 12, вып. 4. — С. 741-745.
5. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. М. 1:10 000 000. — М.: ГУГК при СМ СССР, 1971. — 18 с.
6. Метревели Г.С., Плоткина И.А. Особенности расчета среднего многолетнего уровня Черного моря // Сакартвелос ССР Мецниеребата Академиис моамбе: Сообщ. АН ГССР. — 1981. — 103, № 1. — С. 89-92.
7. Метревели Г.С., и др. Особенности расчета скоростей колебаний уровня моря и поверхности суши по уровенным рядам // Метеорология и гидрология. — 1985. — № 2. — С.
8. Метревели Г.С., Кучуашвили Н.К. Исследование влияния эвстатического повышения уровня воды на внутренние моря // Метеорология и гидрология. — 1987. — № 8. — С. 90-95.
9. Рева Ю.А. Межгодовые колебания уровня Черного моря // Океанология. — 1997. — 37, № 2. — С. 211-219.
10. Trifonova E., Demireva D. An investigation of sea level fluctuations in Varna and Bourgas // Трудове на Института по океанология Българска академия на науките. — Том 4. — Варна, 2003. — С. 3-8.
11. Калинин Г.П., Клиге Р.К., Шлейников В.А. К вопросу учета современных вертикальных движений морских побережий при исследовании Мирового океана // Колебания уровня Мирового океана и вопросы морской геоморфологии. — М.: Наука, 1975. — С. 93-101.
12. Johansson, J. M., Carlsson, T. R., Davis, J. L., Elgered, G., Jarlemark, P. O. J., Mitrovica, J. X., Pysklywec, R. N., Ronnang, B. O., Scherneck, H-G. and Shapiro, I. I. (1996): First result from a continuously operating GPS network in Fennoscandia // Ann. Geophy. — 1996. — 14 (1). — С. 271 European Geophysical Society Symposium, The Hague.
13. Vilibic I. Global sea level rise? New techniques for the absolute sea level measurement // Geofizika. — 1997. — vol. 14. — P. 23-28

Зроблено критичний огляд методів одержання даних про сучасні вертикальні рухи земної кори на узбережжі Чорного моря. Запропоновано новий метод на основі аналізу тривалих рядів спостережень за його рівнем. Метод базується на розділенні постійної величини тренда та його змінної частини у внутрішньому сигналі.

The critical review of data acquisition methods about modern vertical movements of earth's crust at the Black sea coast is shown. The new method of such data reception from the analysis of long time series of supervision over sea level is suggested. The method is based on division of constant trend and its changeable part in an intraannual signal.