

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука  
Российской академии наук

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА ВАРИАЦИОННОЙ АССИМИЛЯЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ В  
МОДЕЛИ ГИДРОТЕРМОДИНАМИКИ ЧЕРНОГО, АЗОВСКОГО И МРАМОРНОГО  
МОРЕЙ ПО ДАННЫМ БУЕВ ARGO

Макарычев В.Д.    Захарова Н.Б.

# Цель работы

Цель этого исследования заключается в проверке результатов расчётов численной модели INMOM с использованием методов вариационной ассимиляции спутниковых данных о температуре поверхности моря (ТПМ) для акваторий Черного, Азовского и Мраморного морей, основываясь на данных системы буев ARGO.

Сравнение температурных полей, рассчитанных моделью, с наблюдениями из системы ARGO позволяет выявить расхождения и области, где ассимиляция данных значительно влияет на расчёты гидрофизических параметров в модели INMOM.

Полученные результаты также сопоставляются с предыдущими исследованиями, посвященными воспроизведению глубоководной циркуляции в Черном море **[1-3]**.

[1] Коршенко Е.А., Дианский Н.А., Фомин В.В. Воспроизведение глубоководной циркуляции Черного моря с помощью модели INMOM и сопоставление результатов с данными буев ARGO // Морской гидрофизический журнал (2018) 35 №3, 220-232.

[2] Маркова Н.В., Дымова О.А. Валидация результатов численного моделирования гидрофизических полей Черного моря под основным пикноклином с использованием данных ARGO // Процессы в геосредах (2019) № 1 (19), 45-50.

[3] Лукьянова А.Н., Багаев А.В., Пластун Т.В., Маркова Н.В., Залесный В.Б., Иванов В.А. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: численные эксперименты на основе модели ИВМ РАН и сравнение с данными банка данных МГИ РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря (2016) №3, 9-14.

# Расчеты численной модели INMOM

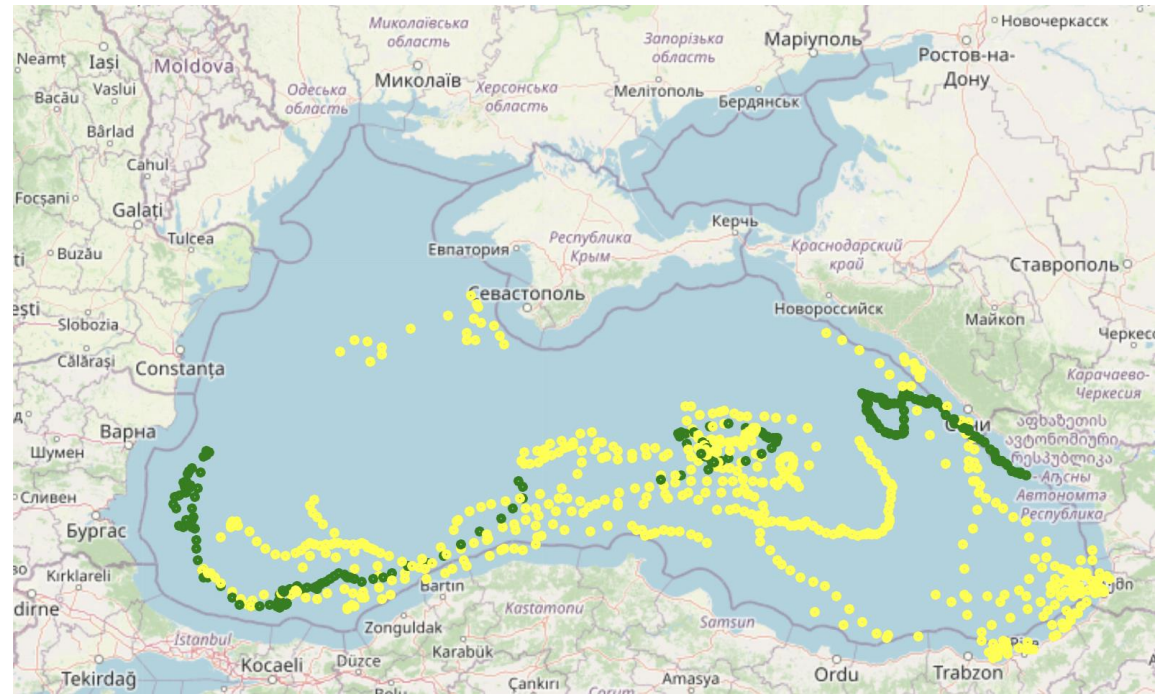
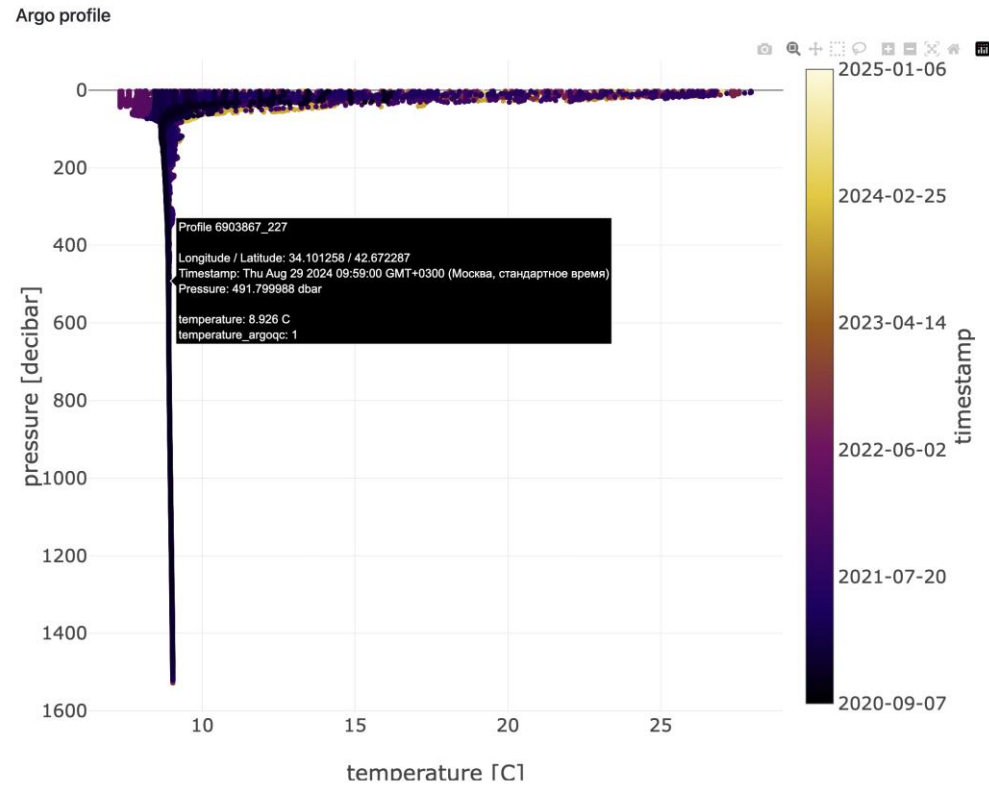
Расчет основных гидрофизических параметров исследуемых морских акваторий проведён на основе численной модели гидротермодинамики INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) с горизонтальным разрешением 4 км и 20  $\sigma$ -уровнями по глубине. В рамках настоящей работы проводится верификация расчетов численной модели в акватории Черного и Азовского морей. Оценивается точность расчетов трехмерных полей температуры и солёности в исследуемой акватории на примере расчетных данных за 2021 год.

Результаты расчетов указанной численной модели были получены с использованием процедур вариационной ассимиляции [4] данных о температуре поверхности моря. Усвоены данные со спутников Aqua и Terra (спектрорадиометр MODIS), Suomi NPP (сканирующий радиометр VIIRS) и Sentinel 3 (радиометр LSTR), предоставленных ЦКП «ИКИ - Мониторинг» [5].

[4] Shutyaev V.P., Parmuzin E.I.: Variational Data Assimilation for the Sea Thermodynamics Model and Sensitivity of Marine Characteristics to Observation Errors // Izv. Atmos. Ocean. Phys. (2023) vol. 59, 722–730.

[5] Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев, И.В. Балашов, С.А. Барталев, В.Ю. Ефремов, А.В. Кашницкий, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев, О.А. Суднева, И.Г. Сычугов, В.А. Толпин, И.А. Уваров. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (2015) 12 № 5, 263-284.

# Данные наблюдений



Данные о буйах-профилемерах ARGO были получены с платформы ARGOVIS [<https://argo.ucsd.edu>], на которой представлен мониторинг траекторий движения буйев. Кроме того, данная платформа предоставляет возможность детального анализа информации о погружениях и измерениях, проводимых каждым из буйев в Черном море.

# Корректность данных

Корректность данных определялась на основе параметров точности измерений, встроенных в буи, где параметр 1 соответствует максимальной точности, а параметр 4 — наименьшей. Основными параметрами, извлеченными из наблюдений, являются: номер измерения, географическая широта и долгота, давление (в дбар), температура и соленость.

Номер буя ARGO	Рассматриваемый период эксплуатации	Парковочная глубина / максимальная глубина [м]	Количество рассматриваемых профилей
3901852	02.01.2021 - 31.12.2021	1500	71
3901854	02.01.2021 - 27.12.2021	1500	73
3901855	05.01.2021 - 27.12.2021	1500	69
6903271	05.01.2021 - 31.12.2021	1500	73
6903766	05.01.2021 - 27.12.2021	1500	72
6903782	05.01.2021 - 27.12.2021	1500	73
7900595	11.01.2021 - 21.12.2021	800	37

**Таблица 1.** Некоторые параметры рассматриваемых буев ARGO, дрейфующих в ЧМ в 2021 г.

# Метод интерполяции данных

## Линейная интерполяция в многомерном пространстве

### Триангуляция

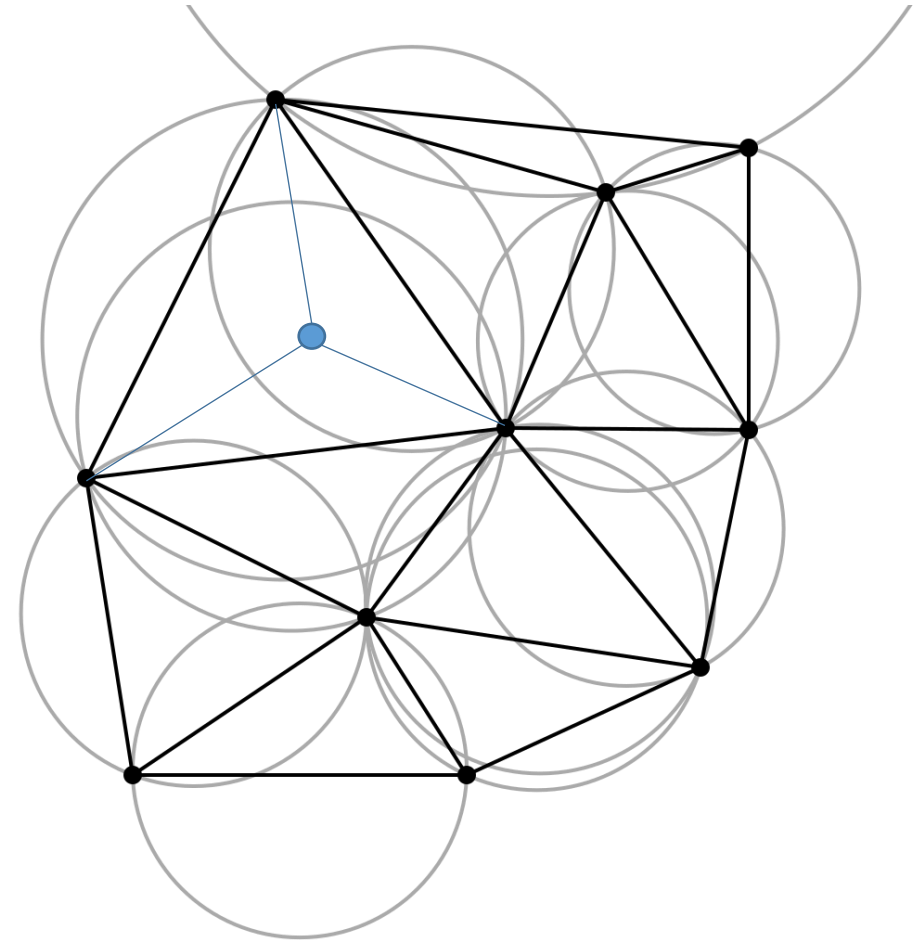
Триангуляция представляет собой процесс разбиения многомерного пространства на простейшие многогранники, такие как треугольники в 2D или тетраэдры в 3D. Этот процесс реализуется с помощью алгоритма Делоне, который стремится минимизировать узкие треугольники и обеспечивает равномерное распределение узлов.

### Интерполяция

После построения триангуляции можно производить интерполяцию значений в новых точках, оценивая их на основе значений в вершинах соответствующего многогранника. Интерполяция осуществляется как конвективная комбинация значений в этих вершинах.

### Линейная интерполяция

При линейной интерполяции, если новая точка находится внутри или на границе треугольника или тетраэдра, интерполированное значение вычисляется через взвешенную сумму значений в вершинах, где веса пропорциональны расстояниям до этих узлов. Это позволяет обеспечить непрерывность функции и точность оценок в многомерном пространстве.



# Слои черноморских вод

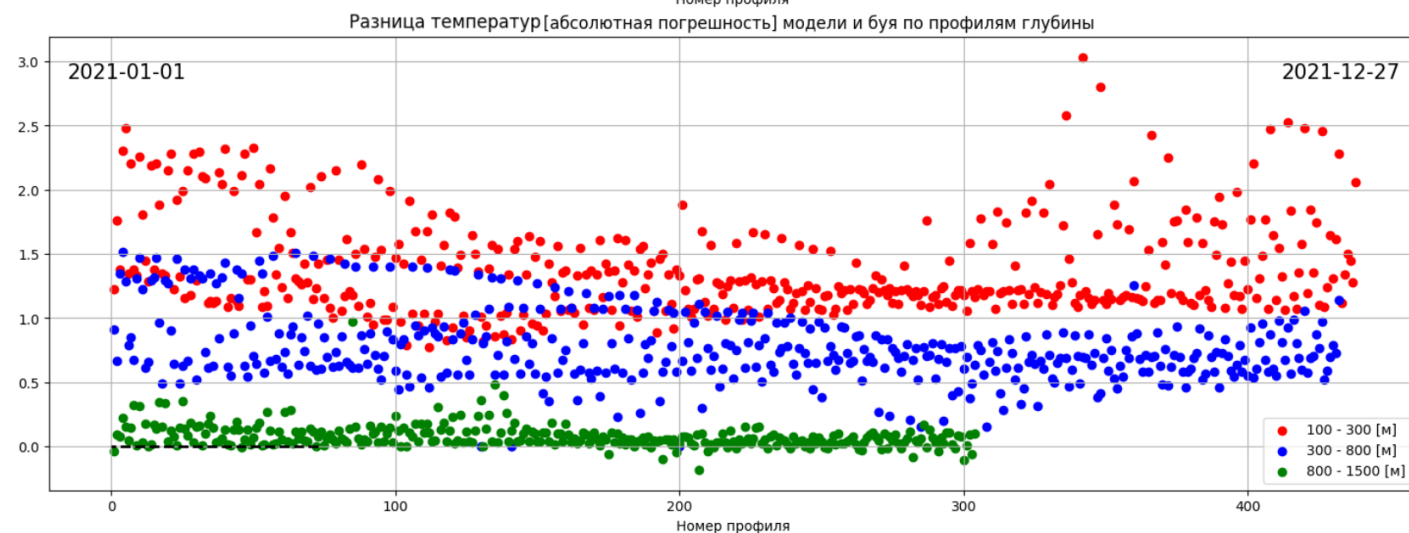
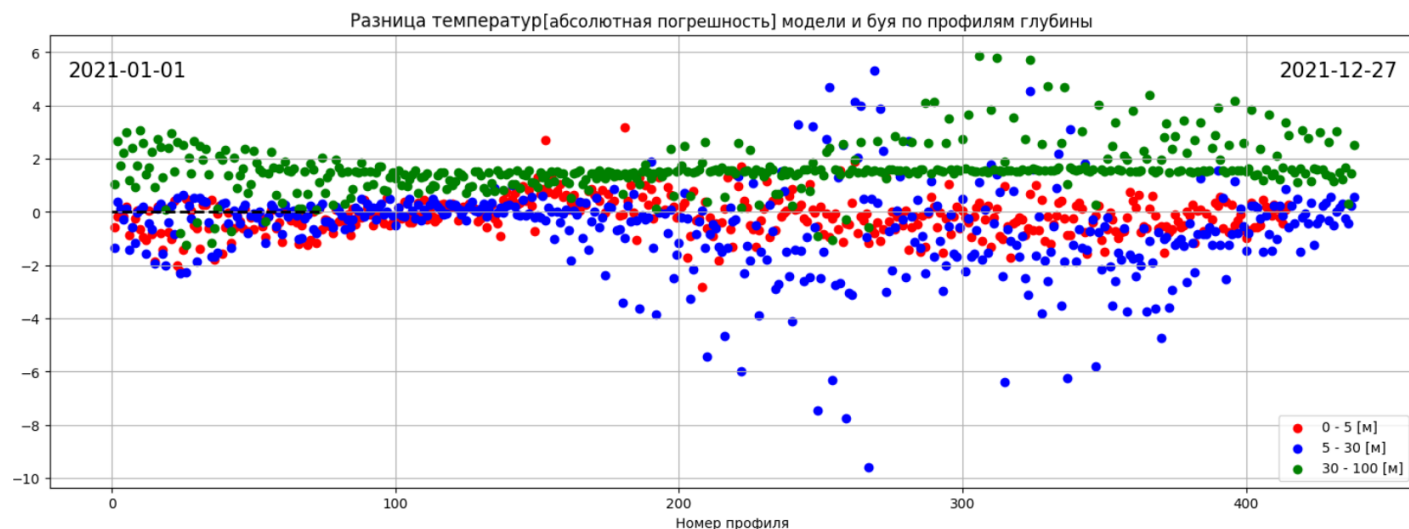
При анализе использовалось разбиение по глубинам в соответствии с определенными слоями черноморских вод [1], а именно:

Слой черноморских вод	Глубина слоя [м]
Приповерхностный слой	0 - 5
Верхний перемешанный слой	5 - 30
Холодный промежуточный слой	30 - 100
Основной пикноклин	100 - 300
Верхний слой субпикноклина	300 - 800
Нижний слой субпикноклина	800 - 1500

Горизонт на уровне 800 [м], разделяющий субпикноклин, выбирается из-за обнаруженной интенсификации скоростей течений на данной глубине и ниже до 1200 [м]. Последний слой ограничивается глубиной в 1500 [м], так как это максимальная глубина профилирования буюми

ARGO

# Сравнение температур модели и буев



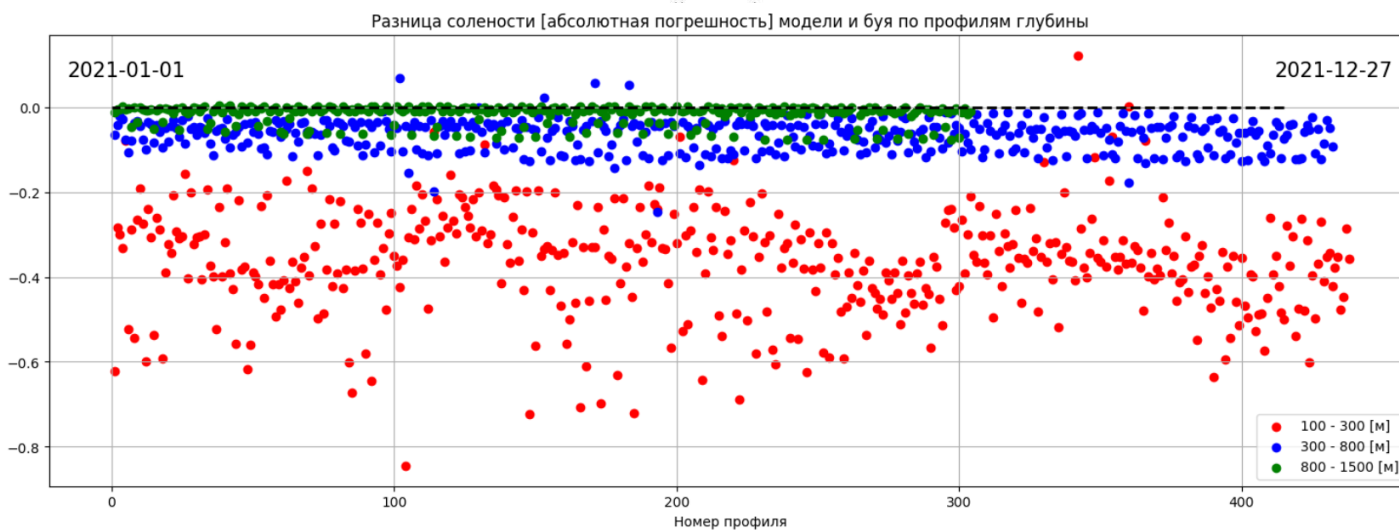
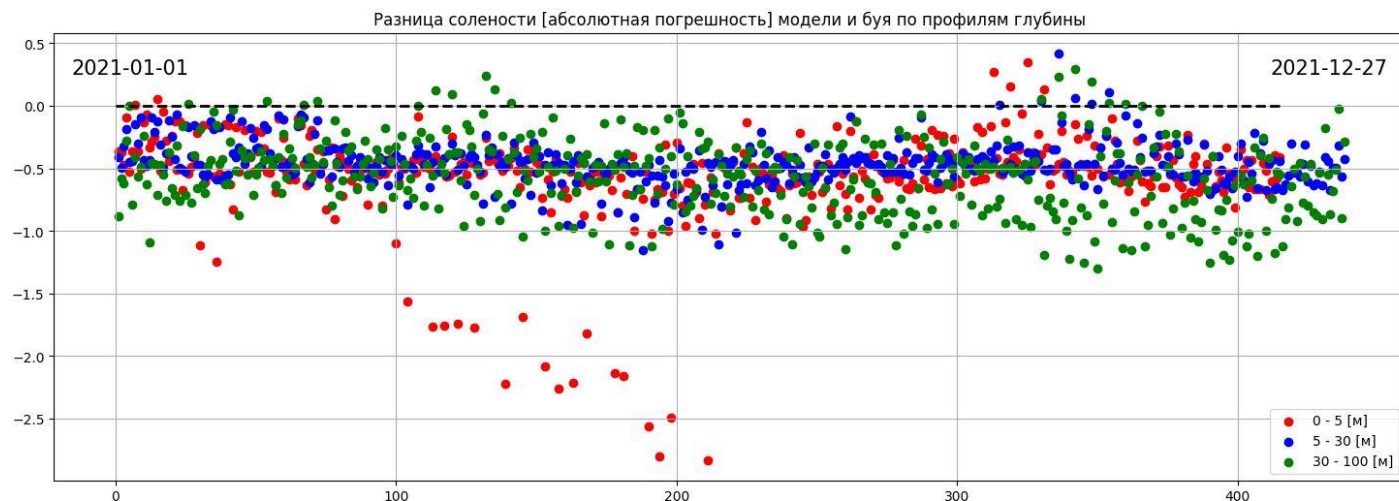
Анализ графиков свидетельствует о том, что на всех разрезах глубины, начиная с 30 метров, модель демонстрирует завышенную оценку температур по сравнению с данными, полученными с помощью буев. В то же время, на глубине от 0 до 5 метров наблюдается хорошая согласованность расчетов модели и данных наблюдений, что связано с тем, что вариационная ассимиляция позволяет учитывать данные о температуре поверхности моря при построении решения модели.

Интересно отметить, что вторая половина года характеризуется значительным разбросом данных на малых глубинах. Это может указывать на то, что верхний промежуточный слой недостаточно хорошо описывается моделью, что наиболее заметно в летний период, когда из-за солнечного прогрева конвективные процессы становятся особенно активными. Наибольшие отклонения отмечены в холодном промежуточном слое, в основном в пикноклине.

Что касается диапазона глубин от 30 до 100 метров, мы наблюдаем, что в течение года значение разницы температур стремится к единому значению. Это можно объяснить тем, что на этих глубинах влияние поверхностных процессов уменьшается, что ведет к более однородным условиям и снижению вариативности температурных измерений.



# Сравнение солености модели и буев



Анализ графиков свидетельствует о том, что на всех разрезах глубины модель демонстрирует **заниженную** оценку значений солености по сравнению с данными, полученными с помощью буев. Наблюдается также резкое увеличение разброса значений начиная с глубины 5 метров, что может указывать на влияние определенных факторов, таких как изменение гидродинамических условий или вариации в структуре водного столба, которые начинают оказывать значительное влияние на измерения на данной глубине. Кроме того, возможной причиной отклонений могут быть систематические ошибки датчиков, что требует дополнительной проверки.

На диапазоне глубин 30-300 метров наблюдается наибольшее отклонение в значениях солености, что полностью согласуется с результатами исследования [1]. Стоит также отметить, что относительная погрешность составляет не более 3% (сведения уточняют в таблице; если будет использовано слишком маленькое значение, стоит перепроверить данные).

С увеличением глубины данных можно заметить, что расчет модели становится более точным. Это можно объяснить тем, что на больших глубинах имеется меньшее количество переменных, способных влиять на точность измерений, таких как атмосферные воздействия, волновые процессы и другие поверхностные явления. Таким образом, данные, полученные на больших глубинах, могут отражать более стабильные и предсказуемые условия, что способствует повышению точности оценок модели.

# Заключение

1. Вариационная ассимиляция данных спутниковых наблюдений существенно повышает точность расчетов в приповерхностном слое, однако, стоит отметить, что ее влияние на глубинные показатели оказывается сравнительно небольшим. Это подчеркивает важность комплексного подхода к обработке данных, особенно в условиях динамического взаимодействия атмосферных и океанских процессов.
2. Наиболее значительные отклонения в значениях солёности фиксируются в определенных слоях, которые подвержены влиянию различных факторов, таких как гидродинамические условия и смешение вод. Эти данные указывают на необходимость более глубокого исследования динамики в этих зонах, чтобы понимать механизмы изменения солёности на различных глубинах.
3. В модели наблюдается четкий тренд на занижение значений солёности, хотя ошибка не превышает 3%. Этот факт может свидетельствовать о систематических искажениях в расчетах, которые требуют внимательного анализа и корректировки. Стоит уделять особое внимание возможным причинам этих несоответствий, чтобы обеспечить достоверность и надежность прогностических моделей.

Спасибо за внимание