



## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ ДЛЯ ПРИБРЕЖНЫХ ГОРОДОВ

**Ефимова Ольга Леонидовна**

Ведущий научный сотрудник, Институт водных проблем РАН  
г. Москва, Россия

### Аннотация

Повышение уровня моря представляет собой одну из наиболее значительных и неизбежных угроз, связанных с глобальным изменением климата. Основными факторами, способствующими этому явлению, являются термическое расширение океанических вод и таяние ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды. Скорость подъема уровня моря неуклонно растет, создавая критическую ситуацию для прибрежных городов и низменных островных государств. Данная работа анализирует современные методы прогнозирования повышения уровня моря, включая использование спутниковой альтиметрии, палеоклиматических данных и климатического моделирования, а также сценарии, разработанные Межправительственной группой экспертов по изменению климата. Детально рассматриваются последствия этого явления для прибрежных городских территорий: увеличение частоты и интенсивности наводнений, затопление низменных районов, засоление пресноводных водоносных горизонтов, а также эрозия береговых линий. Обсуждаются адаптационные и защитные стратегии, такие как строительство дамб, поднятие инфраструктуры и планирование управляемого отступления.

**Ключевые слова:** повышение уровня моря, климатическое изменение, прибрежные города, термическое расширение, таяние ледников, прогнозирование, наводнения, адаптация.

### Введение

В течение двадцатого и начала двадцать первого веков глобальный средний уровень моря демонстрирует устойчивый рост, который значительно ускорился в последние десятилетия. Этот процесс является прямым следствием антропогенного увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере и сопутствующего глобального потепления. Повышение уровня моря угрожает не только экосистемам мангровых зарослей и коралловых рифов, но и человеческой цивилизации, поскольку значительная часть мирового населения и критической инфраструктуры сосредоточена в низменных прибрежных зонах.

Прогнозирование будущей траектории повышения уровня моря является сложной, но жизненно важной задачей, требующей интеграции данных из океанографии, гляциологии и климатологии. Понимание вероятных сценариев и связанных с ними рисков позволяет прибрежным городам и региональным властям своевременно разработать и внедрить эффективные стратегии адаптации и защиты.

## **Основные Движущие Силы Повышения Уровня Моря**

Повышение уровня моря обусловлено двумя основными физическими процессами, каждый из которых вносит сопоставимый вклад.

**Термическое расширение.** Известное как термостерический эффект, это явление возникает из-за того, что морская вода, как и большинство веществ, увеличивается в объеме при нагревании. Поскольку океан поглощает более девяноста процентов избыточного тепла, удержанного парниковыми газами, происходит его постепенное нагревание и, соответственно, расширение. Этот фактор был доминирующим в первой половине двадцатого века.

**Таяние льда.** В настоящее время таяние ледниковых щитов и ледников становится все более значимым фактором, вносящим самый большой вклад в повышение уровня моря. Ключевыми источниками пресной воды, поступающей в океан, являются ледниковый щит Гренландии и Западно-Антарктический ледниковый щит. Таяние горных ледников по всему миру, хотя и меньшее по объему, вносит быстрый и заметный вклад. Динамика таяния, особенно нестабильность морских ледников в Антарктиде, вносит наибольшую неопределенность в долгосрочные прогнозы.

**Прочие факторы.** Меньший, но все же значимый вклад вносят изменения в запасах воды на суше, включая строительство водохранилищ, что временно задерживает воду, или, наоборот, чрезмерное извлечение грунтовых вод, которое впоследствии может попасть в океан.

## **Методы и Сценарии Прогнозирования**

Точное прогнозирование требует сочетания исторических данных, спутниковых наблюдений и сложных климатических моделей.

**Спутниковая альтиметрия.** С начала девяностых годов спутниковая альтиметрия обеспечивает высокоточное и непрерывное измерение уровня моря по всей поверхности Земли. Эти данные позволяют отслеживать фактическую скорость подъема и определять региональные различия, связанные с гравитационными изменениями и вертикальными движениями земной коры.

**Климатическое моделирование.** Климатические модели общей циркуляции используются для прогнозирования будущих изменений температуры и, как следствие, термического расширения.

Для моделирования вклада ледниковых щитов используются специализированные гляциодинамические модели, которые учитывают сложные физические процессы, такие как поток льда и влияние талых вод.

Сценарии Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Межправительственная группа экспертов по изменению климата публикует прогнозы, основанные на различных сценариях концентрации парниковых газов. Сценарии с низкими выбросами предполагают повышение уровня моря к концу столетия в диапазоне от тридцати до шестидесяти сантиметров, тогда как сценарии с высокими выбросами могут привести к подъему на уровне более одного метра, а в крайних случаях — почти двух метров, что имеет катастрофические последствия.

### **Последствия для Прибрежных Городов**

Городская инфраструктура и жизнь населения прибрежных зон подвержены множеству негативных воздействий от повышения уровня моря.

Увеличение наводнений. Наиболее непосредственным последствием является увеличение частоты и интенсивности прибрежных наводнений. Небольшое повышение базового уровня моря означает, что даже обычные приливы или умеренные штормы могут вызвать катастрофические затопления в низменных городских районах. Это приводит к значительному ущербу жилой и коммерческой недвижимости, транспортным сетям и объектам жизнеобеспечения.

Засоление водоносных горизонтов. В прибрежных районах пресноводные водоносные горизонты, являющиеся источником питьевой воды для многих городов, могут быть загрязнены проникающей морской водой. Засоление делает воду непригодной для потребления и сельского хозяйства, требуя дорогостоящих систем опреснения или поиска новых источников воды.

Эрозия берегов и затопление. Повышение уровня моря усиливает береговую эрозию и ведет к постоянному затоплению низкорасположенных территорий, включая порты, аэропорты и очистные сооружения. Это вынуждает городские власти рассматривать вопросы о переносе критической инфраструктуры. Эффект наиболее заметен в дельтах рек и на песчаных косах.

Социально-экономические издержки. Последствия включают огромные экономические издержки, связанные с ремонтом после штормов, необходимостью строительства защитных сооружений и потерей земель. Также возникают серьезные социальные проблемы, включая переселение населения и угрозу для объектов культурного наследия.

## Стратегии Адаптации и Защиты

Прибрежные города разрабатывают комплексные планы реагирования, сочетающие инженерные решения с экологическими и управленческими мерами.

**Жесткая защита.** К жестким инженерным стратегиям относятся строительство и модернизация дамб, морских стен и шлюзов. Эти сооружения предназначены для физической защиты от наводнений, но они дороги в строительстве и обслуживании, а также могут нарушать природные прибрежные экосистемы и эстетику городской среды.

**Мягкая адаптация.** Мягкие адаптационные меры включают восстановление естественных барьеров, таких как дюны, мангровые заросли и водно-болотные угодья, которые служат природными амортизаторами штормовых волн. К ним также относятся меры пространственного планирования, такие как установление запретных зон для строительства, повышение уровня улиц и зданий, и улучшение дренажных систем.

**Управляемое отступление.** В некоторых, наиболее уязвимых или экономически необоснованных для защиты районах может быть принято решение о плановом отступлении — перемещении населения и инфраструктуры подальше от береговой линии. Эта стратегия, хотя и сложна в реализации, может быть наиболее устойчивой в долгосрочной перспективе, особенно при самых пессимистичных сценариях.

## Заключение

Прогнозирование повышения уровня моря ясно указывает на нарастающую угрозу для прибрежных городов мира. Независимо от сценария выбросов, повышение уровня моря продолжится на протяжении столетий из-за тепловой инерции океана и медленной реакции ледниковых щитов. Последствия для городских центров — от учащения наводнений до засоления водоносных горизонтов — требуют немедленного и решительного реагирования. Прибрежным городам необходимо срочно интегрировать самые пессимистичные прогнозы в долгосрочные планы развития, комбинируя жесткие защитные меры, мягкие адаптационные стратегии и, в некоторых случаях, планирование управляемого отступления, чтобы обеспечить устойчивость и безопасность населения перед лицом неизбежного изменения климата.

## Литература

1. Волков И. А. Управление прибрежными зонами в условиях климатических изменений. – М.: Физматлит, 2024. – 450 с.
2. Ефимова О. Л. Моделирование вклада ледниковых щитов в повышение уровня моря. // Гидрология и климатология. – 2025. – Т. 16, № 3. – С. 88–101.
3. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. – М.: Мысль, 1982. – 192 с.

4. Church J. A., White N. J. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. // Surv. Geophys. – 2011. – Vol. 32, № 4-5. – P. 585–602.
5. Oppenheimer M., et al. Sea level rise and coastal areas. // Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. IPCC. – 2014. – P. 53–54.