

УДК 551.46

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ МОДИФИКАЦИИ ОПРЕСНЁННЫХ МОРСКИХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ШЕЛЬФА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Е. О. Дубинина^{1,*}, А. Ю. Мирошников¹, С. А. Коссова¹,
член-корреспондент РАН М. В. Флинт²

Поступило 27.07.2018 г.

Предложена новая модель смешения-модификации, действие которой иллюстрируется на примере данных, полученных в области шельфа моря Лаптевых, находящегося под воздействием стока Лены. Для этих вод наблюдается модификация с избыточным повышением солёности относительно изотопного состава кислорода, задаваемого смешением вод Лены с водами арктического бассейна. Модель учитывает процесс модификации вод за счёт формирования и выноса льда.

Ключевые слова: изотопы кислорода и водорода, солёность, морская вода, Арктика, море Лаптевых, опреснение, модификация, замерзание.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843352-357>

ВВЕДЕНИЕ

Область арктического шельфа подвергается мощному опреснению за счёт стока северных рек Евразии, на долю которого приходится более 10% всего речного стока, поступающего в Мировой океан (см. [2] и др.). Численная оценка степени опреснения вод арктического шельфа, обычно проводимая с помощью гидрофизических, геохимических и изотопных трассеров, осложнена процессами формирования льда, которые приводят к отклонению большинства используемых в расчётах параметров от траекторий консервативного смешения. Например, связь изотопного состава кислорода опреснённых вод, имеющая линейный вид при двухкомпонентном смешении, деформируется как за счёт вклада талого морского льда, так и за счёт модификации вод, испытавших формирование и последующий вынос льда. В последнем случае образуются воды, имеющие избыточную солёность по сравнению с ожидаемой при двухкомпонентном смешении. Наиболее ярко эти процессы проявляются в море Лаптевых [3–6], которое поставляет “гиперсолёные” воды в евразийский бассейн Северного Ледовитого океана [7]. Обычно степень опреснения речным стоком рассчитывается по модели смешения, в которой кроме исходной морской воды и реч-

ных вод подразумевается участие талого морского льда [1, 8]. Эта модель не учитывает формирования вод с избыточной солёностью при частичном замерзании и выносе льда, т.е. не всегда корректна для вод арктического шельфа, где наблюдаются резкие градиенты солёности и изотопного состава кислорода, а замерзанию подвергается не чистая, а опреснённая морская вода. Неудивительно, что применение модели трёхкомпонентного смешения к водам шельфа часто приводит к отрицательным величинам доли талого льда, которые предлагается использовать как количественную меру вклада модифицированных вод (см., например, [5, 9, 6]). Однако такой приём корректен только в случае замерзания вод с постоянными изотопными параметрами и таяния льда в месте его формирования, т.е. в зонах, удалённых от активного влияния речного стока и не испытывающих воздействия заметных поверхностных течений и перемешивания под воздействием ветров.

В настоящей работе предлагается новый подход для численной оценки опреснения речным стоком вод арктического шельфа с учётом процессов формирования льда. Результаты его применения сравниваются с результатами применения общепринятой модели трёхкомпонентного смешения [1], активно используемой в настоящее время. Все расчёты проведены на основе данных по изотопному составу кислорода и солёности вод моря Лаптевых, отобранных в зоне активного опреснения стоком Лены и на континентальном склоне, где влияние речных вод минимально.

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук, Москва

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: elenadelta@gmail.com

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для изотопных исследований был отобран в ходе 63-го и 69-го рейсов нис “Академик Мстислав Келдыш” в летне-осенний сезон 2015 и 2017 гг. Станции, на которых отбирались пробы с разных глубин, расположены вдоль разреза, берущего начало у дельты р. Лена и продолжающегося в меридиональном направлении по 130°30' в.д. до континентального склона (рис. 1).

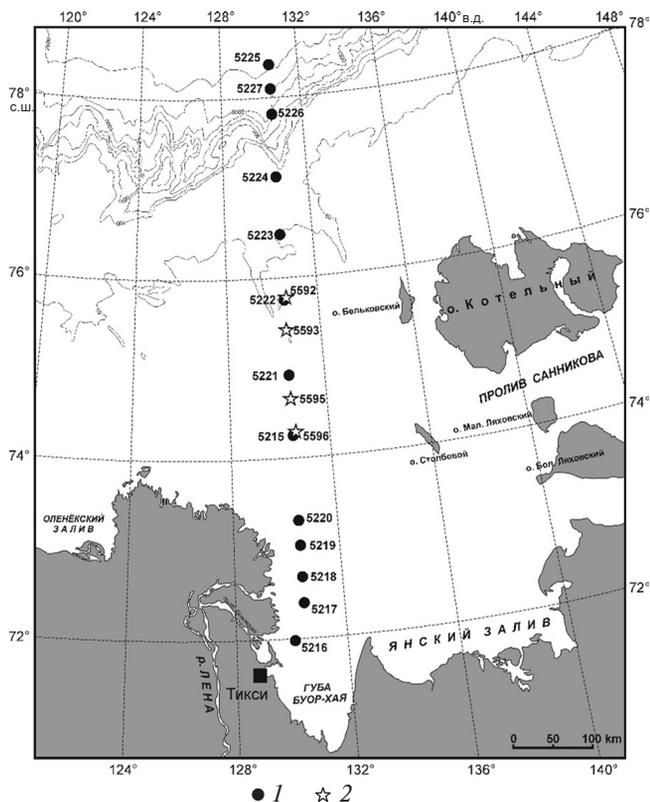


Рис. 1. Положение станций на шельфе моря Лаптевых в 63-м (1) и 69-м (2) рейсах нис “Академик Мстислав Келдыш”.

Отбор проб воды осуществлялся батометрами комплекса SBE32. Изотопный анализ кислорода проведён методом CF IRMS с использованием масс-спектрометра DELTA V+ и опции GasBenchII (Thermo, Германия). Точность определения величин $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0,05\text{‰}$, калибровка проведена в международной шкале “V-SMOW — V-SLAP”. Детальное описание методов содержится в [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изотопный состав кислорода вод шельфа моря Лаптевых показывает черты, характерные для двухкомпонентного смешения вод дельты р. Лена и доминирующих в регионе атлантических водных масс, модифицированных в Баренцевом море [9–11].

Изотопные параметры атлантических вод были установлены на основе детального изучения гомогенных вод Баренцева моря [3]. Изотопный состав кислорода эстуарных вод Лены ($\delta^{18}\text{O} = -19\text{‰}$) получен путём экстраполяции на нулевую солёность по материалам, отобраным в 2015 г. [3]. Полученные оценки для вод Лены близки к оценкам, проведённым в другие годы [4].

Рассмотрение данных в координатах изотопный состав—солёность ($\delta^{18}\text{O}$ —S) показывает, что процессы модификации при замерзании не только имели место, но и играли большую роль в формировании изотопного облика и гидрофизических характеристик вод шельфа моря Лаптевых. На рис. 2 показано соотношение величин $\delta^{18}\text{O}$ и солёности для всех изученных образцов. Полученные данные имеют заметный разброс. Аналогичная картина наблюдалась для моря Лаптевых и в другое время, например с 2007 по 2011 г. [12].

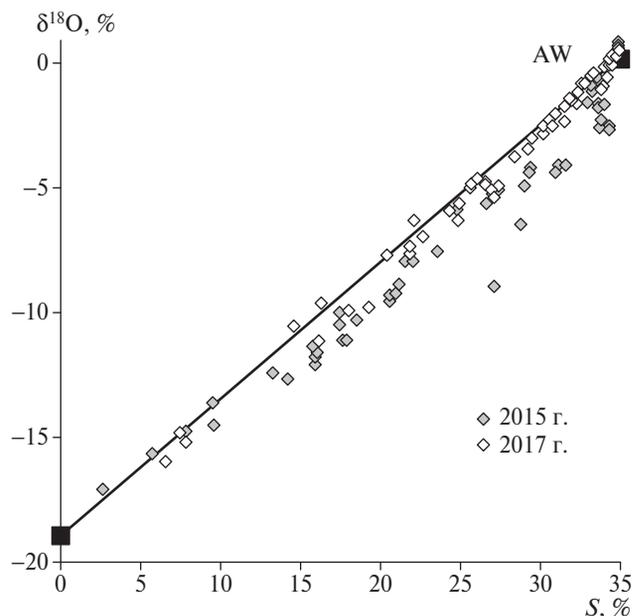


Рис. 2. Связь изотопного состава кислорода и солёности вод на шельфе моря Лаптевых. Изотопные параметры атлантических вод (AW) и речного стока Лены приведены согласно работе [3].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерной чертой процессов замерзания и таяния морского льда является малая величина изотопного эффекта по сравнению с изменением солёности, что выражается почти горизонтальными сдвигами в координатах δ —S [13] и возникновением разброса относительно линии двухкомпонентного смешения. Это связано с тем, что лёд имеет низкую солёность (в среднем ~ 3 – 4‰ согласно [14]) и обогащён изотопами ^{18}O и D в равновесии с водой [15].

Вклад в водную массу талого льда приводит к трансформации связи изотопного состава с солёностью в сторону отклонения составов влево и вверх от линии смешения в координатах δ – S . Модификация вод за счёт формирования и удаления льда приводит к отклонению составов вправо и вниз от линии смешения. Таким образом, модель трёхкомпонентного смешения описывает составы, находящиеся выше линии смешения в координатах δ – S , а модель смешения-модификации описывает составы, расположенные ниже этой линии. Если обратиться к данным, полученным для шельфа моря Лаптевых в зоне влияния стока Лены (рис. 2), можно увидеть, что практически все составы изученных вод отклоняются вправо и вниз от линии смешения атлантических вод Арктического бассейна с водами Лены в координатах δ – S , т.е. относятся к области применения модели смешения-модификации.

Модель смешения-модификации, так же как и модель трёхкомпонентного смешения, позволяет для каждого образца воды с известной солёностью и изотопным составом кислорода рассчитать долю сформированного и вынесенного льда, а также пропорцию смешения морских вод с пресными, например речными водами. При разработке модели было принято допущение, что процессы испарения незначительно влияют на солёность и изотопные параметры морской воды в данном регионе. За основу модели принято условие, состоящее в том, что замерзанию подвергаются опреснённые воды с переменными солёностью и величинами $\delta^{18}\text{O}$, т.е. формируется не морской лёд, а лёд из воды смешанного типа. Изменение солёности на фоне слабого изотопного сдвига трактуется либо в пользу присутствия талого компонента, либо в пользу формирования льда из конкретной порции воды с последующим его удалением [13]. В первом случае происходит избыточное опреснение, а во втором — избыточное осолонение воды относительно идеального двухкомпонентного смешения. Таким образом, основным критерием, который позволяет отнести каждый случай либо к формированию, либо к таянию льда, служит направление трансформации связи изотопный состав—солёность относительно линии идеального смешения, для чего реальную солёность образца воды (S^{sa}) можно сравнить с теоретической солёностью (S^0), задаваемой простым двухкомпонентным смешением

$$S^0 = \frac{\delta^{sa} - \delta^r}{k}, \quad (1)$$

где δ^{sa} и δ^r — изотопный состав кислорода образца и речной воды соответственно; k — угловой коэф-

фициент линии смешения речных и морских вод в координатах изотопный состав—солёность. Свободный член данной линии должен соответствовать величине δ^r . Солёность льда (S^i) можно задать через линейную связь с солёностью образца, т.е. воды, из которой этот лёд сформировался:

$$S^i = S \frac{S^{si}}{S^{aw}}, \quad (2)$$

где S^{aw} и S^{si} — солёность атлантических вод и морского льда соответственно.

Материальный баланс по солёности

$$S^0 = x(i)S^i + [1 - x(i)]S^{sa} \quad (3)$$

позволяет рассчитать долю сформированного льда:

$$x(i) = \frac{S^0 - S^{sa}}{S^i - S^{sa}}. \quad (4)$$

В уравнениях (3), (4) S^i — солёность сформированного льда, S^0 и S^{sa} — солёность воды до и после замерзания, а $x(i)$ — доля сформированного льда из данной порции воды. Величина S^{sa} отвечает солёности, измеренной в исследуемом образце воды.

Знаменатель дроби в уравнении (4) всегда отрицателен, поэтому знак величины $x(i)$ определяется соотношением реальной и теоретической солёности образца. Для вод, испытавших формирование льда и его удаление, величина $x(i)$ является положительной, а для вод, дополнительно опреснённых талым компонентом ($S < S^0$), величина $x(i)$ является отрицательной. К использованию отрицательных оценок величины $x(i)$ в данной модели (так же как к использованию отрицательных величин талого льда, $f(m)$, в модели трёхкомпонентного смешения) необходимо относиться с большой осторожностью. В качестве компромисса можно использовать подход, когда образцы с отрицательными величинами $x(i)$ интерпретируются отдельно в рамках модели трёхкомпонентного смешения [1]. При положительных значениях $x(i)$ можно корректно рассчитать доли сформированного льда и речных вод по уравнениям изотопного баланса, приведённым ниже.

Принимая, что до формирования льда изотопный состав кислорода образца воды соответствовал величине δ^0 , а после формирования порции льда с усреднённой величиной δ^i и его выноса за пределы рассматриваемой системы остаётся вода, имеющая величину δ^{sa} (т.е. величину $\delta^{18}\text{O}$ изученного образца), можно записать

$$\delta^0 = \delta^{sa}[1 - x(i)] + \delta^i x(i), \quad (5)$$

где $x(i)$ — доля сформировавшегося льда в порции исходной воды, рассчитанная по уравнению (4). В модели полагается, что формирование льда происходит в изотопном равновесии со всей оставшейся порцией воды. В отдельных случаях не исключён процесс рэлеевской дистилляции, но в данной работе эта часть модели опущена. Изотопный состав кислорода сформированного льда можно выразить через сумму

$$\delta^i = \delta^{sa} + \Delta(i - w), \quad (6)$$

где $\Delta(i - w)$ — равновесный коэффициент фракционирования в системе лёд—вода. Комбинация уравнений (5) и (6) позволяет найти исходный изотопный состав кислорода образца воды до его замерзания:

$$\delta^0 = \delta^{sa} + \frac{x(i) \cdot \Delta(i - w)}{1 - x(i)}. \quad (7)$$

Величина δ^0 , вычисленная по уравнению (7), соответствует положению точки образца на линии идеального двухкомпонентного смешения речных и атлантических вод в координатах изотопный состав—солёность. Дальнейшее нахождение пропорций смешивающихся компонентов сводится к решению материального баланса относительно величины δ^0 :

$$\delta^r x(r) + \delta^{sw} (1 - x(r)) = \delta^0, \quad (8)$$

где δ^r и δ^{sw} — изотопный состав кислорода крайних членов смешения, а величина $x(r)$ — доля речной воды в двухкомпонентной смеси. Доля морских вод в этой смеси составляет

$$x(sw) = 1 - x(r). \quad (9)$$

В отличие от модели трёхкомпонентного смешения в модели смешения-модификации сумма долей сформированного льда, морской и речной воды не равна единице:

$$x(i) + x(r) + x(sw) \neq 1. \quad (10)$$

Оценки доли речных вод, полученные по моделям смешения-модификации и трёхкомпонентного смешения близки только в области низких долей речного стока (рис. 3). С ростом опреснения разница в оценках возрастает и может достигать 20%, причём оценки по модели модификации-смешения всегда ниже оценок, полученных по модели трёхкомпонентного смешения. Как следует из диаграммы на рис. 4, расхождение оценок доли речных вод коррелирует с долей сформированного льда $x(i)$, следовательно, причина различий оценок участия речных вод, получаемых по разным моделям, лежит в разном подходе к оценке роли процессов замерзания-таяния и модификации вод.

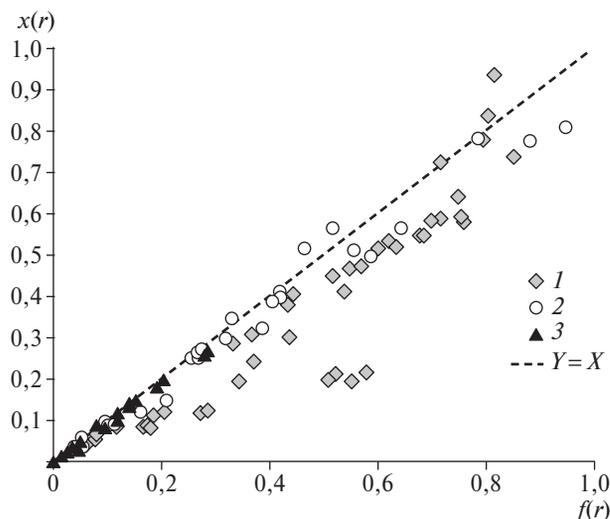


Рис. 3. Оценки доли речного стока для вод шельфа моря Лаптевых, полученные по модели трёхкомпонентного смешения ($f(r)$) и модели смешения-модификации ($x(r)$): 1 — образцы шельфовых вод, отобранные в 2015 г., 2 — образцы шельфовых вод, отобранные в 2017 г., 3 — образцы из верхнего слоя моря на станциях 5225–5227, расположенных в зоне континентального склона.

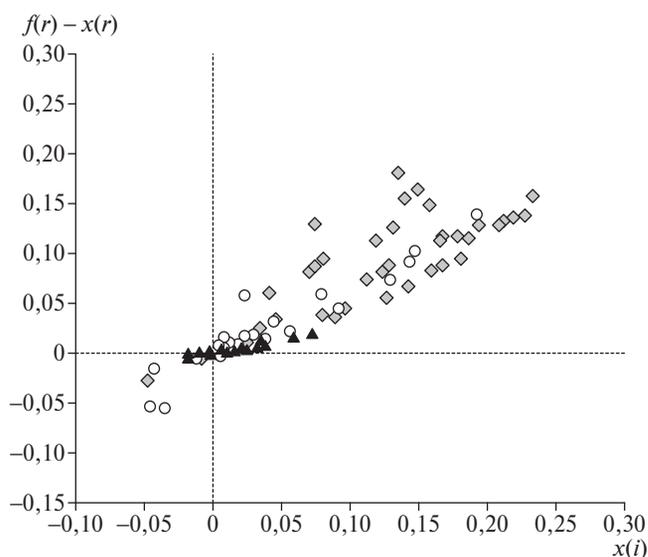


Рис. 4. Расхождение оценок доли речного стока между моделями трёхкомпонентного смешения ($f(r)$) и смешения-модификации ($x(r)$) в зависимости от доли сформированного льда, рассчитанной по модели смешения-модификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель смешения-модификации пригодна для изучения вод, модифицированных при формировании льда, позволяет корректно рассчитать вклад речных вод и долю удалённого льда, что принципиально важно при исследовании пространственно-временной изменчивости морских аркти-

ческих природных комплексов. Сравнение моделей трёхкомпонентного смешения и смешения-модификации путём расчёта одних и тех же параметров для одних и тех же образцов показывает, что каждая из моделей работает в своей области соотношений солёности и изотопных параметров воды. Наиболее рациональным, по-видимому, является подход, когда в расчёте используется либо одна, либо другая модель. Предложенный параметр $x(i)$ может быть использован как критерий в выборе подходящей модели для расчёта. Для вод, испытавших формирование льда и его удаление, величина $x(i)$ является положительной, и в этом случае следует применять модель смешения-модификации. Модель трёхкомпонентного смешения, напротив, можно применять в случае отрицательных величин $x(i)$. При таком комплексном подходе расчёты будут освобождены от получения нереальных и отрицательных величин долей компонентов смеси, а также от завышенных оценок вклада речного компонента.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 18–17–00089. Полевые исследования поддержаны проектом РНФ № 14–50–00095.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ostlund H.G., Hut G. Arctic Ocean Water Mass Balance From Isotope Data // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 6373–6381.
2. Ekwurzel B., Schlosser P., Mortlock R., Fairbanks R. River Runoff, Sea Ice Meltwater, and Pacific Water Distribution and Mean Residence Times in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106 (C5). P. 9075–9092.
3. Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Кокрятская Н.М. Изотопная (δD , $\delta^{18}O$) систематика вод морей арктического сектора России // *Геохимия*. 2014. Т. 11. С. 1041–1052.
4. Bauch D., Hölemann J., Willmes S., Gröger M., Novikhin A., Nikulina A., Kassens H., Timokhov L. Changes in Distribution of Brine Waters on the Laptev Sea Shelf in 2007 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C11008.
5. Bauch D., Hölemann J., Nikitina A., Wegner C., Janout M., Timokhov L.A., Kassens H. Correlation of River Water and Local Sea-Ice Melting on the Laptev Sea Shelf (Siberian Arctic) // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 550–561.
6. Bauch D., Cherniavskaya E., Timokhov L. Shelf Basin Exchange Along the Siberian Continental Margin: Modification of Atlantic Water and Lower Halocline Water // *Deep-Sea Res.* 2016. V. I. № 115. P. 188–198.
7. Johnson M.A., Polyakov I.V. The Laptev Sea as a Source for Recent Arctic Ocean Salinity Changes // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 10. P. 2017–2020.
8. Bauch D., Cherniavskaya E. Water Mass Classification on a Highly Variable Arctic Shelf Region: Origin of Laptev Sea Water Masses and Implications for the Nutrient Budget // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2018. V. 123. <https://doi.org/10.1002/2017JC013524>
9. Bauch D., Torres-Valdes S., Polyakov I., Novikhin A., Dmitrenko I., McKay J., Mix A. Halocline Water Modification and Along-Slope Advection at the Laptev Sea Continental Margin // *Ocean Sci.* 2014. V. 10. P. 141–154.
10. Frew R.D., Dennis P.F., Heywood K.J., et al. The Oxygen Isotope Composition of Water Masses in the Northern North Atlantic // *Deep-Sea Res.* 2000. V. 47. P. 2265–2286.
11. Bauch D., Hölemann J.A., Dmitrenko I.A., et al. Impact of Siberian Coastal Polynyas on Shelf-Derived Arctic Ocean Halocline Waters // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C00G12.
12. Thibodeau B., Bauch D., Kassens H., Timokhov L.A. Interannual Variations in River Water Content and Distribution over the Laptev Sea Between 2007 and 2011: The Arctic Dipole Connection // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 7237–7244.
13. Craig H., Gordon L. Deuterium and Oxygen-18 Variations in the Ocean and the Marine Atmosphere. In: *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. Spoleto, 1965. P. 9–130.
14. Cox G.F.N., Weeks W.F. Salinity Variations in Sea Ice // *J. Glac.* 1974. V. 13. № 67. P. 109–120.
15. Lehmann M., Siegenthaler U. Equilibrium Oxygen- and Hydrogen-Isotope Fractionation Between Ice and Water // *J. Glac.* 1991. V. 37. P. 23–26.

**NUMERICAL ESTIMATIONS OF DESALINATED
SEAWATER MODIFICATION USING LAPTEV SEA SHELF
SEAWATER AS THE EXAMPLE**

**E. O. Dubinina, A. Yu. Miroshnikov, S. A. Kossova,
Corresponding Member of the RAS M. V. Flint**

Received July 27, 2018

A new model for describing the behavior of the isotope ($\delta^{18}\text{O}$, δD) parameters of desalinated seawater during freezing is proposed. The model was tested using the Laptev Sea shelf waters, which are actively desalinated by the Lena river input and modified by the freezing and ice removing. It is shown that taking into account the modification process leads to the correction of estimates of the fraction of fresh water input up to 20%. A criterion for determination of model availability is proposed.

Keywords: Oxygen and hydrogen isotopes, salinity, seawater, Arctic, Laptev Sea, freshening, modification, freezing.