ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 492, № 2, с. 105–110

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.465.7

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АПВЕЛЛИНГОВ В АТЛАНТИЧЕСКОМ И ТИХОМ ОКЕАНАХ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН А. Б. Полонский[1,*], А. Н. Серебренников[1]

Поступило 03.02.2020 г.
После доработки 31.03.2020 г.
Принято к публикации 01.04.2020 г.

По спутниковым данным о температуре поверхности океана с 1985 г. (с пространственным разрешением 0.05° × 0.05°) и приводном ветре с 1992 г. (в узлах регулярной сетки 0.25° × 0.25°) проанализированы параметры низкочастотной изменчивости полей, характеризующие интенсивность Канарского, Бенгельского, Калифорнийкого, Перуанского и Чилийского апвеллингов. Показано, что анализируемые крупномасштабные апвеллинги ветрового происхождения интенсифицируются. Для каждого апвеллинга оценены вклады в эту интенсификацию усиления сгонного ветра и изменения вертикальных скоростей, обусловленные пространственной неоднородностью поля ветра.

Ключевые слова: океанические апвеллинги, приводный ветер, термический индекс апвеллинга

DOI: 10.31857/S268673972006016X

ВВЕДЕНИЕ

Океанические апвеллинги, примыкающие к западным побережьям Африки и Америки, относятся к наиболее высокопродуктивным регионам Мирового океана и относительно неплохо изучены. Известно, что они возникают, прежде всего, вследствие сгонного ветрового эффекта и особенностей восточных пограничных течений Атлантического и Тихого океанов. В Атлантике они представлены Канарским и Бенгельским апвеллингами. В Тихом океане – Калифорнийским, Перуанским и Чилийским апвеллингами [1–7].

Достаточно часто интенсивность апвеллингов оценивается с помощью так называемого термического индекса апвеллинга (ТИА). Он представляет собой разность температуры поверхности океана (ТПО) в прибрежной и удаленной от области подъема вод зонах [1, 8, 9]. Его широкое использование связано с простотой выделения апвеллинговых областей на основе легко наблюдаемого параметра – ТПО, несмотря на то, что ТИА является косвенной характеристикой апвеллинга и не всегда адекватно отражает интенсивность подъема вод в области апвеллинга (см., например, [1]). Вместе с тем, выполнено несколько численных экспериментов по расчету поля скорости в зонах крупномасштабных океанических апвеллингов с достаточно высоким пространственным разрешением (например, [10]).

Относительно долговременных тенденций в интенсивности апвеллингов восточных частей Атлантического и Тихого океанов при современных климатических трендах опубликованы различные точки зрения. В работе [11] была выдвинута гипотеза об усилении вертикальных движений в зонах океанических апвелингов при глобальном потеплении и описан соответствующий механизм. По мнению автора, интенсификация апвеллингов обусловлена ростом температурного контраста между поверхностью океана и континентом, сопутствующим увеличением градиента давления между сушей и морем и усилением вдольбереговой компоненты прибрежных сгонных ветров. Некоторые публикации подтвердили эту гипотезу [1, 2, 6, 12]. В то же время, авторы работы [10] провели моделирования долговременных тенденций Бенгельского апвеллинга за последние ~50 лет и показали несостоятельность выдвинутой Бакуном гипотезы. Сам Бакун с соавторами в более поздних работах (например,

[1] *Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия*
**E-mail: apolonsky5@mail.ru*

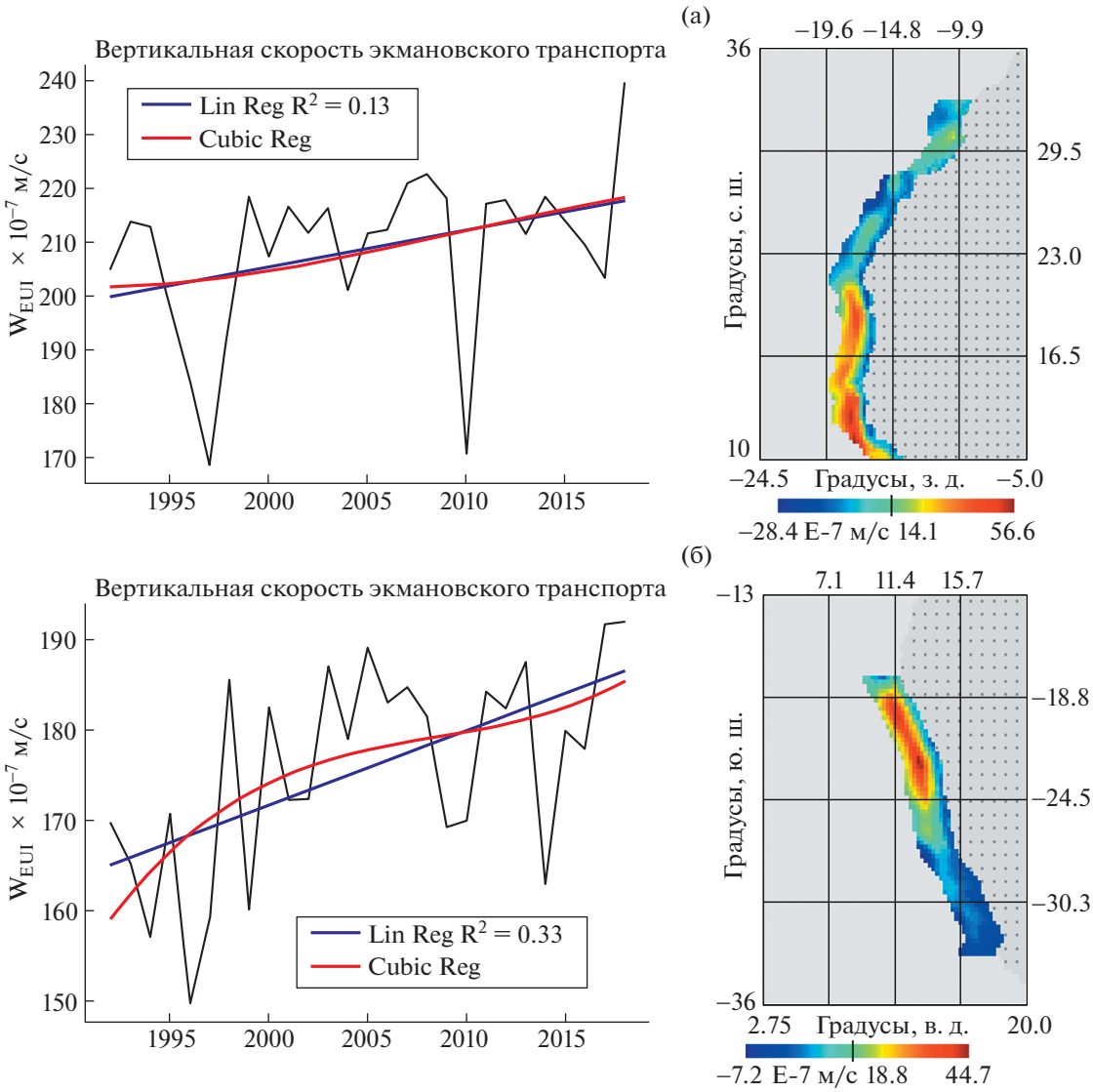

Рис. 1. Межгодовая изменчивость, линейный тренд (LinReg) и аппроксимация 3-го порядка (CubicReg) вертикальной скорости, обусловленной экмановским сгоном ($W_{EUI} \times 10^{-7}$ м/с), для Канарского (а) и Бенгельского (б) апвеллингов. На врезках справа показаны вертикальные скорости экмановской накачки ($W_{EP} \times 10^{-7}$ м/с) за средне-климатический март (для Канарского) и май (для Бенгельского апвеллинга). Положительные величины вертикальной скорости указывают на восходящие движения.

[13]) также выразили сомнения относительно справедливости гипотезы об усилении прибрежного апвеллинга в процессе глобального потепления. Вероятная причина отсутствия такого усиления в некоторых прибрежных районах заключается в том, что долгопериодные климатические тенденции сопровождаются изменением крупномасштабной структуры поля ветра и разнонаправленными трендами в интенсивности вертикальных движений, обусловленных пространственной неоднородностью ветра в апвеллинговых регионах [2].

Таким образом, возникает вопрос о тенденциях в интенсивности крупномасштабных океанических апвеллингов в процессе глобального потепления и их причинах. Выделение таких тенденций для Канарского, Бенгельского, Калифорнийского, Перуанского и Чилийского апвеллингов, а также обсуждение их вероятных причин и является целью настоящей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе проанализированы ежедневные векторные карты приповерхностного ветра с разрешением 0.25° × 0.25° за 27-летний период (с 1992

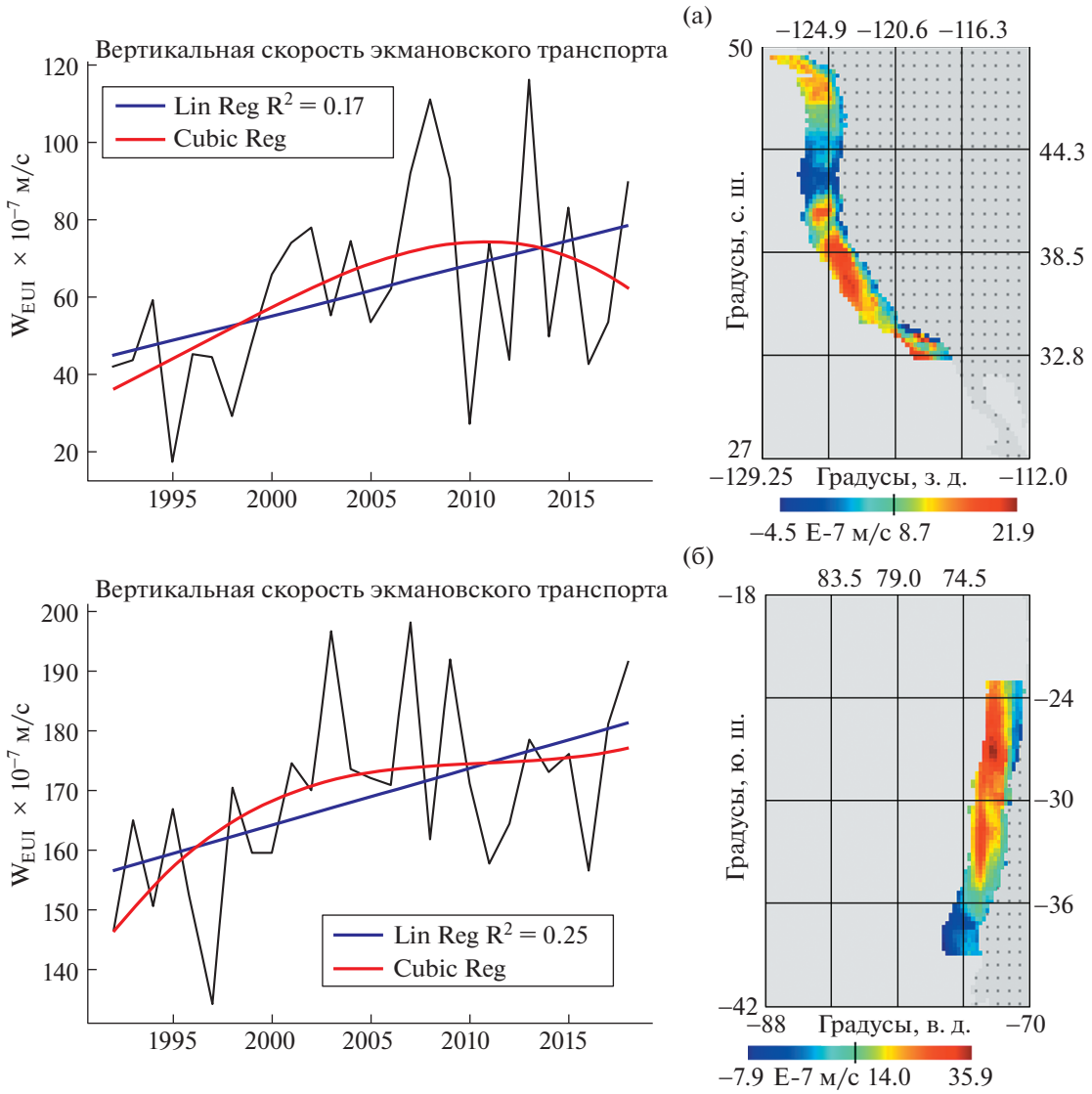

Рис. 2. Межгодовая изменчивость, линейный тренд (LinReg) и аппроксимация 3-го порядка (CubicReg) вертикальной скорости, обусловленной экмановским сгоном($W_{EUI} \times 10^{-7}$ м/с), для Калифорнийского (а) и Чилийского (б) апвеллингов. На врезках справа показаны вертикальные скорости экмановской накачки ($W_{EP} \times 10^{-7}$ м/с) за средне-климатический октябрь (для Калифорнийского) и март (для Чилийского апвеллинга).

по 2018 гг.), полученные с сайта NCEP (National Centers for Environmental Prediction). По этим данным для каждого из рассматриваемых апвеллингов рассчитаны ежесуточные величины вдольбереговой компоненты вектора ветра, экмановского сгона (W_{EUI}), модуля скорости приповерхностного ветра (ПВ), и вертикальной экмановской скорости, обусловленной пространственной неоднородностью поля ветра (W_{EP}). Для косвенной характеристики интенсивности апвеллинга использовались данные о ТПО с разрешением 0.05° × 0.05° с 1985 по 2018 гг., полученные с сайта CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). По ним вычислялись минимальные величины ТИА в средне-климатических масках, рассчитываемых с использованием пороговых значений для разности ТПО в прибрежной и удаленной оффшорной зонах. Подробности выбора этих пороговых значений и их влияние на результаты расчетов проанализированы в работе [1]. В отличие от этой работы, тренды ТИА рассчитывались для усредненных (по 50 минимальным значениям ТИА) месяцев с максимальной интенсивностью апвеллинга. Расчеты остальных параметров проводились в специальных фикси-

Таблица 1. Параметры линейных трендов интенсивности вертикальных движений и минимальных значений термического индекса апвеллинга, осредненных для каждого из рассматриваемых океанических апвеллингов

Анализируемые апвеллинги в Атлантике и Тихом океане	Вертикальная скорость сгонного характера, W_{EUI}			Вертикальная скорость, связанная с пространственной неоднородностью поля ветра, W_{EP}			Минимальные значения термического индекса апвеллинга		
	R^2	Inc, 10^{-7} м/с	Proc, %	R^2	Inc, 10^{-7} м/с	Proc, %	R^2	Inc, °C	Proc, %
Канарский	0.13	17.8	3.8	0.11	1.7	3.2	0.48	–1.5	10.9
Бенгельский	0.33	21.4	5.3	0.21	2.4	3.1	0.2	–0.5	4.7
Калифорнийский	0.17	33.6	19.8	0.32	3.8	12	0.12	–0.8	5.5
Перуанский	0.01	0.7	0.3	0.08	4.5	2.6	0.34	–2.2	16.6
Чилийский	0.25	24.7	6.3	0.18	2.9	3.7	0.3	–0.8	10.1

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации линейных трендов; Inc – общее приращение каждого параметра за весь анализируемый период, связанное с линейным трендом, Proc – приращение каждого параметра за весь анализируемый период, связанное с линейным трендом, относительно среднего значения (в %).

рованных масках, построенных для каждого апвеллинга в своем диапазоне широт и ограниченных по долготе береговой линией и кривой, удаленной от берега на расстояние 1.75°.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Вертикальные движения, обусловленные ветровым сгоном и завихренностью поля ветра, интенсифицируются во всех анализируемых апвеллинговых зонах (рис. 1 и 2, табл. 1). Однако, значимость линейных трендов в зоне Атлантических апвеллингов в целом выше, чем в области Тихоокеанских. В значительной степени этот результат связан с тем, что в апвеллинговых зонах Тихого океана линейный тренд вертикальной скорости, связанный с изменением ветровых условий, явно не является оптимальной аппроксимацией для анализируемого временного периода. Сравнение рис. 1 и 2 показывает, что, если в Атлантике значительные различия между линейным и кубическим трендами на рассматриваемом временном отрезке отсутствуют, то в Тихом океане эти тренды более существенно отличаются между собой. Это свидетельствует о важной роли естественных низкочастотных вариаций в поле ветра, особенно выраженных в восточной части Тихого океана. Этот результат объясняется наличием в Тихом океане не только интенсивной междесятилетней изменчивости (типа Тихоокеанской декадной осцилляции), но и квази-регулярной генерации здесь наиболее мощного межгодового сигнала в системе “океан–атмосфера”– Эль-Ниньо – Южной осцилляции [14].

Основной вклад в интенсификацию вертикальной скорости в зоне большинства апвеллингов вносит усиление экмановского сгона. Его типичная доля порядка 90%. Усиление завихренности поля ветра отвечает приблизительно за 10% интенсификации вертикальных движений в области апвеллингов, что подтверждают данные авторов работы [15]. Исключение составляет Перуанский апвеллинг, в котором, напротив, преобладает тренд, обусловленный усилением завихренности поля ветра (табл. 1).

Тренды и статистические характеристики временных рядов минимальных значений ТИА, рассчитанные для всех рассматриваемых апвеллингов, в целом подтверждают сделанные выше выводы (табл. 1). Некоторые различия между трендами ТИА и тенденциями в скорости подъема вод в верхнем слое океана ветрового происхождения обусловлены двумя причинами. Во-первых, ветровые тенденции оценивались по среднегодовым данным, а тренды ТИА – по месяцам с максимальным развитием апвеллинга. Во-вторых, временной ход ТИА отражает не только изменчивость вертикальной скорости, но и интенсивность адвективно-диффузионных процессов в зоне, примыкающей к области апвеллинга [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, все анализируемые крупномасштабные апвеллинги ветрового происхождения в восточных частях Атлантического и Тихого океанов в последние ~30 лет интенсифицируются. В целом, основной вклад в эту интенсификацию вносит увеличение скорости сгонного ветра. Полученные результаты свидетельствует в пользу справедливости гипотезы об интенсификации крупномасштабных океанических апвеллингов при глобальном потеплении, высказанной в работе [11]. Усиление направленной вверх вертикальной скорости, обусловленное пространственной неоднородностью поля ветра, наиболее важно в области Перуанского апвеллинга, где оно превышает интенсификацию подъема вод сгонного характера. Вместе с тем, на фоне линейного тренда выделяются интенсивные квазипериодические колебания в поле ветра межгодового–междесятилетнего масштабов. Они представляют собой проявление естественных вариаций в системе “океан–атмосфера” значительной амплитуды. Их наличие, а также сравнительно небольшая продолжительность накопленных рядов спутниковых данных достаточно высокого разрешения существенно осложняют выделение трендов, связанных именно с глобальным потеплением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность анонимному рецензенту за полезные замечания.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы госзадания № 0012–2019–0002 (“Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polonsky A.B., Serebrennikov A.N.* Long-Term Sea Surface Temperature Trends in the Canary Upwelling Zone and their Causes. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2018. V. 54. № 9. P. 1062–1067.
2. *Полонский А.Б., Серебренников А.Н.* Об изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга. Часть 2: многолетние тенденции. // Исследование Земли из космоса. 2019. № 4. С. 29–39. https://doi.org/10.31857/S0205-96142019429-39
3. *Духова Л.А., Сапожников В.В.* Гидрохимические показатели первичной продукции в зоне Перуанского и Канарского апвеллингов // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 85–100.
4. *Macias D., Landry M.R., Gershunov A., Miller A.J., Franks P.J.S.* Climatic Control of Upwelling Variability along the Western North American Coast // PLoS ONE. 2012. V. 7: e30436. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030436
5. *Seabra R., Varela R., Santos A.M., Gómez-Gesteira M., Meneghesso C., Wethey D.S., Lima F.P.* Reduced Nearshore Warming Associated With Eastern Boundary Upwelling Systems. // Front. Mar. Sci. 2019. V. 6. P. 104. https://doi.org/10.3389/fmars.2019
6. *Varela R., Álvarez I., Santos F., et al.* Has Upwelling Strengthened along Worldwide Coasts over 1982-2010? // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 10016. https://doi.org/10.1038/srep10016
7. *Малинин В.Н., Чернышков П.П., Гордеева С.М.* Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 156 с.
8. *Chavez F.P., Messie M.* A Comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems // Prog. Oceanogr. 2009. V. 83. № 1–4. P. 80–96. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032
9. *Lamont T., García-Reyes M., Bograd S.J., van der Lingen C.D., Sydeman W.J.* Upwelling Indices for Comparative Ecosystem Studies: Variability in the Benguela Upwelling System // Journal of Marine Systems. 2018. V. 188. P. 3–16.
10. *Tim N., Zorita E., Hünicke B.* Decadal Variability and Trends of the Benguela Upwelling System as Simulated in a High Ocean-only Simulation // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 483–502. https://doi.org/10.5194/os-11–483–2015
11. *Bakun A.* Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling // Science. 1990. V. 247. P. 198–201. https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198
12. *Narayan N., Paul A., Mulitza S., Schulz M.* Trends in Coastal Upwelling Intensity During the Late 20th Century. // Ocean Sci. 2010. 6. P. 815–823. https://doi.org/10.5194/os-6-815-2010
13. *Bakun A.,Field D.B., Redondo-Rodriguez A., Weeks S.J.* Greenhouse Gas, Upwelling-Favorable Winds, and the Future of Coastal Ocean Upwelling Ecosystems // Global Change Biology. 2010. V. 16. № 4. P. 1213–1228. https://doi.org/10.1111/j.1365–2486.2009.02094.x
14. *Polonsky A.* The Ocean’s Role in Climate Change. // Cambridge Scholars Publishing, Newcastle. UK. 2019. 294 p.
15. *Junker T., Schmidt M., Mohrholz V.* The Relation of Wind Stress Curl and Meridional Transport in the Benguela Upwelling System // Journal of Marine Systems. 2015. V. 143. P. 1–6.

INTENSIFICATION OF THE ATLANTIC AND PACIFIC LARGE-SCALE UPWELLINGS UNDER RECENT CLIMATE CONDITIONS

Correspondent Member of the RAS A. B. Polonsky[a,#] and A. N. Serebrennikov[a]

[a] *Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation*

[#] *E-mail: apolonsky5@mail.ru*

Using satellite data on sea surface temperature since 1985 (with space resolution of 0.05 by 0.05 deg.) and sea surface wind since 1992 (at the mesh 0.25 by 0.25 deg.) the parameters of the low-frequency variability of the fields characterizing the intensity of Canary, Benguela, Californian, Peruvian and Chilean upwellings have been analyzed. It is showed, that above large-scale wind-driven upwellings are intensified. The shares of the strengthen alongshore wind and change of the vertical velocities due to space inhomogeneity of the wind field in this intensification are assessed for each upwelling.

Keywords: oceanic upwellings, surface wind, thermal index of upwelling