

О.В. Жильцова, А.А. Исаев

**ДИАГНОЗ ВЕКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗА
ТЕНДЕНЦИИ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ
ТЕРМИЧЕСКИХ И ОСАДКООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ
СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Рассматривается возможность прогноза уровня Каспийского моря на основе термических и осадкообразующих свойств синоптических процессов. Для построения статистической модели совместно используются метод приращений и метод группового учета аргументов. По данным расчетов следует ожидать дальнейшее повышение уровня Каспия: в 1993 г. до – 26,93 м, в 1994 г. до – 26,76 м и в 1995 г. до – 26,64.

Значительные изменения уровня Каспия давно привлекали внимание исследователей. Особенно актуальна эта проблема в наши дни, когда поднятие уровня Каспийского моря грозит катастрофическими последствиями для городов прибрежной зоны. В настоящее время, как известно, существует три основные гипотезы о причинах этих изменений [9]: вероятностная, рассматривающая колебания уровня как результат случайных вариаций составляющих водного баланса; геологическая, объясняющая колебания уровня тектонической деятельностью в районе Каспия; климатическая, согласно которой изменения уровня есть отражение крупномасштабных гидрометеорологических процессов, происходящих не только в бассейне Каспийского моря, но и далеко за его пределами. Цель настоящей статьи рассмотреть аспекты последней из упомянутых гипотез.

Нами проводились исследования связи колебаний уровня Каспийского моря с атмосферными процессами. Для этого была использована их типизация для первого естественного синоптического района, разработанная Л.В. Клименко [7]*. Основываясь на результатах [5, 6], все синоптические процессы были поделены на сухие и дождливые, теплые и холодные в зависимости от их термических и осадкообразующих свойств.

Анализ соотношений дождливых и сухих синоптических процессов показывает, что прослеживается достаточно хорошая сопряженность между тенденцией этих характеристик и колебаниями уровня моря.

С начала века до 70-х годов на Европейской территории России в основном устойчиво преобладали более сухие атмосферные процессы, а дождливые находились в явном дефиците (табл. 1). В начале 70-х годов наступил перелом, и тенденция изменилась на противоположную. Аналогичную картину мы можем проследить и в поведении уровня Каспийского моря: практически на всем участке с начала века до 1977 года наблюдалось понижение уровня, а с 1978 года – его резкий подъем. Таким образом, целесообразно полагать, что подъем или падение уровня Каспийского моря определяются особенностями синоптических процессов на Европейской территории России.

Так как полное понимание механизма воздействия различных причин на уровень Каспия вряд ли возможно в ближайшее время, то целесообразны постепенная трансформация исходных данных в другие легче предсказываемые последовательности и построение различных статистических или физико-статистических моделей, которые, возможно, не раскрывая полностью механизмы взаимодействия, определяли бы будущее состояние уровня Каспийского моря. Основой для разработки таких прогнозов является утверждение, что во временных последовательностях гидрометеорологических процессов содержится вся основная информация о причинах его развития.

Отношения числа лет с преобладанием дождливых синоптических процессов к числу лет с их дефицитом в теплые и холодные полугодия* по фазам колебаний Каспийского моря

Периоды колебаний, годы	Холодное полугодие	Теплое полугодие	За год	Поведение уровня Каспия
1901 – 1909	0,33	0,80	0,80	стабилизация
1909 – 1932	0,53	1,56	1,09	стабилизация
1933 – 1940	1,00	0,50	0,30	падение
1941 – 1948	0,33	0,60	0,60	стабилизация
1948 – 1956	0,50	0,60	0,33	падение
1956 – 1973	0,56	0,64	0,75	стабилизация
1974 – 1977	0,33	4,00	0,67	падение
1977 – 1991	4,00	1,50	6,50	подъем

*В Классификации Л.В. Клименко все синоптические процессы поделены на процессы теплого и холодного периодов.

В данной статье для построения такой модели были использованы описанные ниже прогностические свойства совокупностей приращения совместно с методом группового учета аргументов (МГУА). Сущность этого метода (более подробно см. в [1]) сводится к следующему. Если исходные данные представляют собой стационарные случайные последовательности, а функция близости определяется при помощи полинома Колмогорова – Габора, то указанный метод предлагает искать решение для нахождения коэффициентов полинома при помощи системы нормальных уравнений Гаусса.

Методическая особенность метода состоит в рекуррентном решении нескольких систем нормальных уравнений, составленных для каждой пары аргументов и для новых вспомогательных величин. Конечный результат такого метода – резкое повышение точности решения при одновременном уменьшении объема вычислений. Повышение точности связано с тем, что, с одной стороны, МГУА имеет иерархическую структуру алгоритма, с другой – позволяет организовать отбор <полезной> информации от <вредной> при помощи порогов, применяемых на каждом уровне решения элементарной системы нормальных уравнений. Если бы было возможно решить систему нормальных уравнений сразу для всех аргументов, точность представления была бы недостаточной из-за малой выборки данных и нестационарности отклонений.

Помимо алгоритмов МГУА для прогноза уровня Каспийского моря в данной статье был учтен опыт методологии сверхдолгосрочных прогнозов, который показывает, что прогностические оценки могут быть более эффективны, если используются временные последовательности предикторов, трансформированные относительно первичных наблюдений в приращения различных порядков [3, 4]:

$$\Delta_i^1 = x_i - x_{i-1}, \Delta_i^2 = \Delta_i^1 - D_{i-1}^1, \dots, \Delta_n^k = \Delta_n^{k-1} - \Delta_{n-1}^{k-1},$$

где x_1, x_2, \dots, x_i – значения некоторого временного ряда; n – длина исходного ряда; Δ_n^k – приращение порядка k .

Совокупности приращений различных порядков обладают полезными прогностическими свойствами [3]. Так, например, одним из важнейших свойств индивидуальных приращений является то, что каждое из приращений с порядком k можно интерпретировать как ускорение процессов с порядком $k - 2$, которые сравнительно с исходными значениями x_i более динамичны по отношению к ускорениям различного порядка внешне воздействующих процессов [3], влияние которых, следовательно, будет проявляться вначале на приращениях. Это позволяет утверждать, что приращения различного порядка могут быть легче прогнозируемы, чем непосредственные величины гидрометеорологических элементов, и их целесообразно использовать для целей долгосрочного прогноза.

Зная прогностическое значение приращения какого-либо порядка в год $n+1$, можно с помощью несложных математических преобразований получить прогностическое значение самого временного ряда в год $n+1$.

Число дождливых, сухих, теплых и холодных синоптических процессов для теплого и холодного сезона и их приращения различного порядка были использованы нами в качестве ис-

ходных предикторов. Изначально было $8 \times 30 \times 11 = 2640$ предикторов, где 8 – это 4 типа синоптических процессов (теплые, холодные, дождливые, сухие) за теплый и холодный сезоны, 30 – временная задержка до 30 лет (т. е. учет влияния предыстории за 30 лет), 11 – число приращений по каждому предиктору (до 11-го порядка). В качестве предиктанта (Y) брались первые приращения высоты уровня Каспийского моря. Это было связано с тем, что при использовании приращений первого порядка, во-первых, сглажено влияние трендов, во-вторых, при восстановлении уровня Каспийского моря они дают меньшую ошибку в отличие от приращений более высоких порядков.

Процедура МГУА предусматривает несколько этапов отбора предикторов. После первого этапа отбора было оставлено 8 предикторов (см. табл. 2): X_1 – приращение 1-го порядка от числа сухих синоптических процессов теплого периода с временной задержкой 3 года; X_2 – приращение 1-го порядка от числа теплых синоптических процессов за теплый период с временной задержкой 3 года; X_3 – приращение 1-го порядка от числа дождливых синоптических процессов теплого периода с временной задержкой 3 года; X_4 – приращение 1-го порядка от числа теплых синоптических процессов холодного периода с временной задержкой 3 года; X_5 – приращение 1-го порядка от числа холодных синоптических процессов холодного периода с временной задержкой 3 года; X_6 – приращение 3-го порядка от числа сухих синоптических процессов холодного периода с временной задержкой 3 года; X_7 – приращение 3-го порядка от числа дождливых синоптических процессов холодного времени года с временной задержкой 3 года; X_8 – приращение 10-го порядка от числа холодных синоптических процессов теплого периода с временной задержкой 3 года, которые отвечали следующим требованиям:

- 1) наличие высокого коэффициента корреляции с прогнозируемым рядом ($r > 40\%$);
- 2) независимость их между собой;
- 3) возможность спрогнозировать уровень Каспийского моря по использованной совокупности приращений на ближайшие 3 года (т.е. временная задержка должна быть более 2-х лет).

На 2-м этапе отбора были отфильтрованы предикторы на основании требования $r > 60\%$ со стандартной ошибкой прогноза уровня $< 0,07$ м. При принятых критериях отбора два последних предиктора (Y_{7-8}) не удовлетворяли требованию – коэффициент корреляции r с прогнозируемым рядом оказался меньше 60%, стандартная ошибка прогноза S больше 0,07 м.

На последнем этапе отбора информативных данных коэффициент корреляции достиг 72%, стандартная ошибка уменьшилась до 0,057 м. В результате итоговые уравнения для прогноза приращений 1-го порядка уровня Каспийского моря (Y) имели вид

$$Y = -0,029096 + 0,622836 Y_{1-2} + 0,610935 Y_{3-4-5-6}, \quad (1)$$

где $Y_{1-2} = 0,138053 - 0,001136 X_1 - 0,037287 X_2$, $Y_{3-4-5-6} = -0,018972 + 0,650619 Y_{3-4} + 0,503278 Y_{5-6}$,
 где $Y_{3-4} = 0,117313 + 0,02745 X_3 + 0,025297 X_4$, $Y_{5-6} = 0,153319 - 0,034388 X_5 - 0,025336 X_6$,
 X_1, X_2, \dots, X_6 – предикторы.

Прогностическое соотношение, по которому восстанавливается уровень Каспия (Y^*):

$$Y^* = D_{n-1}^1 + Y - 27,17, \quad (2)$$

где Δ_{n-1}^1 – приращение 1-го порядка уровня Каспийского моря в год, предшествующий прогнозу; Y – прогностическое значение приращения 1-го порядка уровня Каспия в год прогноза по соотношению (1).

Таблица 2

Предикторы итогового уравнения (1)

Предикторы	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	<i>r</i>	<i>S</i>
1-й этап отбора																				
(X_1)	2,37	-0,98	-0,26	-1,94	1,65	-0,98	0,45	0,69	0,93	-0,50	0,69	0,69	-1,46	1,93	0,69	-0,98	-0,26	1,41	-52	
(X_2)	2,00	-1,74	0,32	-1,93	0,32	0,32	2,00	0,50	2,00	-0,81	0,13	1,25	-1,74	0,88	1,81	-0,06	-0,43	0,69	-65	
(X_3)	-1,41	2,03	1,05	2,03	-0,42	2,03	0,56	0,56	-0,42	1,05	0,07	-1,16	0,80	-0,18	0,80	2,52	1,79	-0,18	51	
(X_4)	-2,27	0,88	-0,69	-0,02	-0,02	0,66	-1,37	-0,69	-1,59	0,21	2,46	0,21	-0,47	0,67	-0,69	-1,59	-0,24	-1,37	51	
(X_5)	2,74	-0,08	1,04	0,86	0,48	-0,08	1,61	1,05	2,55	0,67	-1,21	0,86	0,67	-0,47	0,86	1,61	0,67	3,11	-47	
(X_6)	1,18	-0,32	0,48	-1,66	0,87	-0,08	-1,43	1,58	-1,03	1,35	-1,82	0,79	-0,08	0,48	-1,19	1,50	-1,03	0,00	-43	
(X_7)	-1,07	0,53	-0,27	1,24	-0,89	-0,45	1,33	-0,89	0,45	-1,60	1,87	-0,36	-0,36	-0,89	1,69	-1,43	1,25	-0,27	40	
(X_8)	-0,88	1,56	-1,95	1,71	-0,67	-0,77	1,88	-2,28	2,13	-1,76	1,49	-1,48	1,57	-1,43	0,88	-0,03	-0,80	1,14	-52	
2-й этап отбора																				
Y_{1-2}	0,06	0,20	0,13	0,21	0,12	0,13	0,06	0,12	0,06	0,17	0,13	0,09	0,20	0,10	0,07	0,14	0,15	0,11	65	0,063
Y_{3-4}	0,02	0,20	0,13	0,17	0,11	0,19	0,10	0,12	0,07	0,15	0,18	0,09	0,13	0,10	0,12	0,15	0,16	0,08	62	0,065
Y_{5-6}	0,03	0,16	0,11	0,17	0,11	0,14	0,13	0,08	0,09	0,10	0,24	0,10	0,13	0,12	0,15	0,06	0,16	0,05	60	0,067
Y_{7-8}	0,09	0,14	0,11	0,16	0,10	0,11	0,16	0,09	0,14	0,08	0,18	0,11	0,12	0,10	0,17	0,09	0,15	0,12	40	0,076
3-й этап отбора																				
$Y_{3-4-5-6}$	0,01	0,19	0,12	0,18	0,11	0,18	0,11	0,09	0,07	0,13	0,22	0,09	0,13	0,11	0,14	0,11	0,16	0,05	65	0,063
Y	0,04	0,30	0,15	0,28	0,09	0,06	0,05	0,04	0,07	0,11	0,18	0,01	0,10	0,17	0,13					
Y'	0,01	0,21	0,12	0,21	0,11	0,16	0,08	0,10	0,05	0,15	0,18	0,08	0,18	0,10	0,10	0,12	0,17	0,08	72	0,057

Результаты восстановления уровня Каспийского моря по (2) и фактические значения приведены на рис. 1.

На основании рассмотренной статистической модели можно сделать следующие выводы. В ближайшее время будет наблюдаться дальнейший подъем уровня Каспийского моря: в 1993 году на 12 см относительно среднего уровня за 1992 год минус 27,05 м, в 1994 году на 17 см относительно 1993 г. (высота минус 26,76 м), в 1995 году на 8 см относительно 1994 г. (высота минус 26,64 м). Стандартная ошибка прогнозов 0,06 м.

Увеличение числа информативных предикторов, очевидно, приведет к повышению точности такого рода прогноза. Нами была совершена попытка использовать, помимо числа синоптических процессов и их приращений различного порядка, в качестве предикторов также среднемесячные температуры воздуха в координатах сетки $5 \times 5^\circ$, расположенных преимущественно в бассейне реки Волга (данные с 1891 по 1990 гг.).

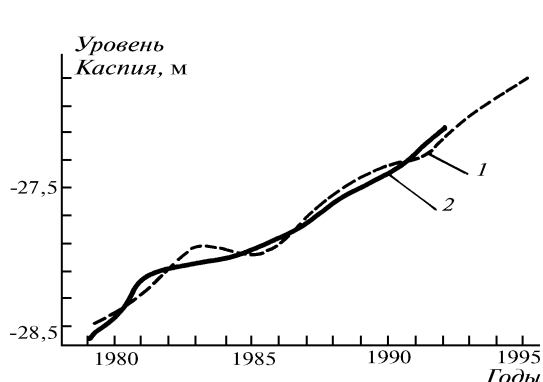


Рис. 1. Прогностическое (1) и фактическое (2) значения уровня Каспийского моря

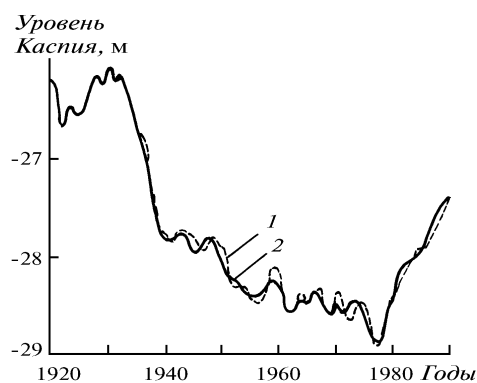


Рис. 2. Прогностические (1) и фактические (2) оценки уровня Каспийского моря

Была построена статистическая модель, аналогичная описанной выше, в которую в качестве исходных предикторов, помимо используемых ранее, были включены еще среднемесячные значения температур в 16 узлах координатной сетки и их приращения до 11-го порядка, влияние предыстории учитывалось также в течение 30 лет. Для каждого 15-летия строилась своя зависимость (1935–1950, 1950–1965, 1965–1980, 1975–1990 гг.)

Использование новых предикторов позволило ввести более жесткие критерии отбора на каждом этапе. Так, первый этап отбора прошли предикторы, коэффициенты корреляции с которыми r больше 60%; второй этап прошли предикторы с r больше 55–71% (в зависимости от 15-летия).

Качество прогноза с применением дополнительных предикторов значительно лучше (см. рис. 2 и табл. 3), стандартная ошибка уменьшилась до 0,02 – 0,04 м, коэффициент корреляции между восстановленными и фактическими значениями увеличился до 81 – 97%.

Таблица 3

Среднеквадратическая ошибка σ восстановленных значений уровня Каспийского моря и коэффициент корреляции r их с фактическими данными

Годы	σ	r
1935 – 1950	0,02	0,97
1950 – 1965	0,02	0,85
1965 – 1980	0,04	0,81
1975 – 1990	0,02	0,85

Таким образом, данный метод прогноза позволяет восстановить участки с переломами в ходе уровня Каспийского моря. Улучшить результаты прогноза можно путем введения в модель новых предикторов.

1. Ивахненко А. Г., Лапа В. Г. Предсказание случайных процессов. Киев. Наукова думка, 1971.
2. Исаев А. А., Клименко Л. В., Сундареев В. Б., Борисова Н. Н. // Циркуляция атмосферы и колебания климата / Под ред. Ю.П. Перевезенцева. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1989. С. 66 – 74.
3. Исаев А. А. // Труды ВНИИГМИ – МЦД, 1987. Вып. 140. С. 104 – 143.
4. Климатические ресурсы и их прикладное использование. / Под ред. Исаева А.А., Петросянца М.А. М.: Изд-во МГУ. С. 136 – 146.
5. Клименко Л. В. Макросиноптические условия происхождения зимних осадков в Москве. Погода и климат Москвы и Московской области. // Труды МосЦГНС, 1989. Вып. 3. С. 57 – 62.
6. Клименко Л. В. Там же. С. 51 – 56.
7. Клименко Л. В. Синоптико-климатическая типизация атмосферных процессов и ее каталог. М.: Изд-во МГУ, 1976.
8. Материалы Всесоюзного совещания по проблеме Каспийского моря. 3 – 5 июня 1991 года. Гурьев, 1991.
9. Технико-экономическое обоснование защиты народно-хозяйственных объектов и населенных пунктов прибрежной зоны Каспийского моря в пределах Российской Федерации. Отчет ВНИПК <Каспий> при Роскомводе Министерства экологии Российской Федерации. 1992 г.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
15 ноября 1993 г.

O. V. Zhil'tsova, A. A. Isaev. Diagnosis of Secular Variations and Possibility of Forecasting Tendencies in Variation of the Caspian Sea Level Based on Thermal and Precipitation Forming Properties of Synoptic Processes.

This paper presents a discussion of a possibility of forecasting the Caspian sea level based on thermal and precipitation forming properties of synoptic processes. The construction of statistical model simultaneously uses the method of increments and the method of group account for variables. According to our calculations a further increase of the Caspian sea level should be expected up to – 26.93 m in 1993, to – 26.76 m in 1994, and to – 26.64 m in 1995.