



© zorani – iStockphoto

© NASA

### 3.1.12 Die Wasserstandsschwankungen des Kaspischen Meeres als Folge regionaler Klimaschwankungen

GENNADY N. PANIN

*The Caspian Sea level fluctuations as an example of regional climate change: The Caspian Sea, the largest continental lake, without discharge, experienced a sea level decrease of nearly 3 m since approximately 1930. This process was inverted since 1977 so that the earlier conditions are nearly replaced again. Based on climate data covering the period 1961-1990, it is statistically shown that this recent sea level increase was caused by a significant change of the regional wind patterns. A detailed analysis of such a phenomenon is able to demonstrate in which way large-scale climate change can lead to pronounced consequences in the regional scale.*

Die Erforschung der Bildung und Umverteilung von Wasserressourcen an der Erdoberfläche wird immer wichtiger, da schon mit nachteiligen Folgen verknüpfte Veränderungen der Wasservorräte in einigen Regionen der Erde zu verzeichnen waren. Dazu gehört auch der Bereich des Kaspischen Meeres. Dort begann nach einem drastischen Rückgang, der ungefähr um 1930 einsetzte, ab 1977 der Wiederanstieg des Wasserstandes, der 1996 bereits 2,5 m erreicht hatte (vgl. Abb. 3.1.12-1).

Als größtes Binnenmeer der Welt kann das Kaspische Meer als ein abflussloser See angesehen werden. Infolge der starken Wasserstandsschwankungen ist seine Größe nicht konstant. Sie betrug 1930 rund 422.000 km<sup>2</sup>, im Jahr 1985 dagegen nur noch 371.000 km<sup>2</sup>. Gegenwärtig kann wieder mit einem Wert wie vor über 70 Jahren gerechnet werden. Die Oberfläche des

Meeres liegt unter der des Weltmeeres. Gespeist wird das Kaspische Meer durch so bedeutende Flüsse wie Wolga, Ural, Kuma, Terek und andere, die mit ihren großen Einzugsgebieten die Schwankungen des Kaspissee entscheidend beeinflussen.

Es hat den Anschein, dass das Kaspische Meer früher als andere Gewässer auf die globale Klimaänderung reagiert hat. Daher sind die Forschungen in diesem Raum für die Analyse und Vorhersage von Klimaschwankungen außerordentlich wichtig. Die ständigen Änderungen des Wasserstandes und der Wasserhaushaltskomponenten sind auf der Grundlage verschiedener Ansätze und Hypothesen durchaus untersucht worden. Aber bis jetzt ist der physikalische Mechanismus, der zu den beobachteten langzeitlichen Wasserstandsschwankungen des Kaspischen Meeres führt, weitgehend unverstanden geblieben. For-

schungen von GOLITSYN & PANIN (1989), PANIN et al. (1991) und PANIN & DZUYBA (2003) bezeugen aber die vom Klima abhängige Natur der rezenten Variationen des Pegelstandes wie auch der Wärme- und Wasserbilanz dieses Meeres.

Eine zuverlässige Vorhersage des Wasserstandsverhaltens des Kaspischen Meeres ist ein sehr wichtiges angewandtes und grundlegendes Problem. Und seine Lösung ist ohne eine adäquate Beschreibung und Diagnose der Ursachen der Variationen, die für die in den letzten Jahrzehnten aufgetretenen Veränderungen verantwortlich sind, unmöglich.

Die meisten bisher durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen beruhen auf der Hypothese der Klimastabilität während der letzten Jahrzehnte. Auf dieser Grundlage wurden unter anderem lineare und nichtlineare stochastische Modelle entwickelt, die in diskreter oder kontinuierlicher Weise die Wechselwirkung zwischen der inneren Dynamik des Meeres und den kurzperiodischen Einwirkungen der Atmosphäre beschrieben haben. Doch die physikalischen Ursachen, auf die die klar ausgerichteten Tendenzen im Wasserstand dieses Meeres zurückgeführt werden können, sind immer noch nicht vollständig verstanden. Versuche längerfristiger Prognosen haben unterschiedliche Ergebnisse erbracht (s. GOLITSYN et al. 1998, RATKOVICH 1994). Auch BUDYKO et al. (1988) haben sich bemüht, die Entwicklung der Pegelstände des Kaspisees für die nächste Zukunft abzuschätzen, was jedoch ebenfalls nicht erfolgreich war. In diesem Beitrag wird nun versucht, die Ursachen und die prinzipiellen Züge des Auf und Ab im Wasserstandsgeschehen des Kaspischen Meeres festzustellen und zu beschreiben. Grundlage

bilden dabei Messungen des Windvektors in 10 m über Grund. Damit wird ein neues Stadium auf dem Weg zur Entwicklung eines deterministischen Modells erreicht, das die regionale Ausprägung von globalen Klimaschwankungen beinhaltet.

Einerseits sind die Ergebnisse interessant, weil sie klar zeigen, dass Klimaschwankungen im lokalen und regionalen Maßstab bereits eingetreten sind, und andererseits beweisen sie, dass die modernen globalen Zirkulationsmodelle der Klimaforschung nicht nur für die Vorhersage der weltweiten Änderungen genutzt werden können, sondern auch für die Prognose des regionalen und lokalen Klimas.

### Analyse der Wasserhaushaltsvariationen des Kaspischen Meeres

In Arbeiten von GOLITSYN & PANIN (1989), PANIN & DZUYBA (2003) u.a. werden vieljährige Monats- und Jahresmittelwerte der Meeresverdunstung berechnet und analysiert. In die einfachen Berechnungsformeln gehen die Oberflächenwassertemperatur sowie der Dampfdruck (als Maß der Luftfeuchte) und die Windgeschwindigkeit in der wassernahen Luftschicht ein. In gleicher Weise wurden die Daten von Evaporimetern ausgewertet, die in verschiedenen Teilen des Einzugsgebietes des Kaspischen Meeres zur Messung der Verdunstung benützt werden. Im Ergebnis wurden statistisch signifikante, lineare negative Trends in den Zeitreihen der Verdunstung nachgewiesen. Der Ausdruck »statistisch signifikant« bedeutet, dass ein Trend mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% tatsächlich existiert. Der mittlere Trend beträgt  $-86 \text{ mm}/10 \text{ Jahre}$

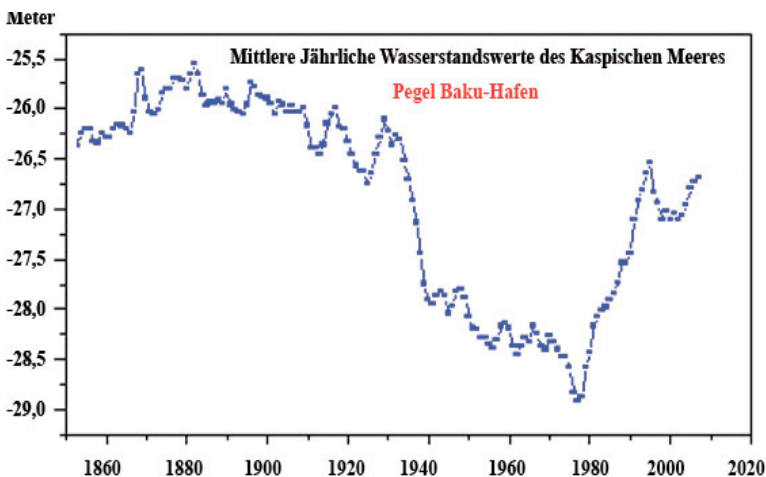


Abb. 3.1.12-1: Wasserstandswerte des Kaspischen Meeres Die Ordinatenwerte beziehen sich auf das mittlere Niveau des Weltmeeres (Quelle: PANIN 2005 ergänzt).

oder etwa 8% des Jahresmittelwertes der Meeresverdunstung. Vergleicht man diesen Befund mit den entsprechenden Zeitreihen des Wasserstandes (PANIN 1999 u.a.), so ergibt sich eine hohe Kohärenz der beiden Prozesse in der Zeit des gegenwärtigen Meeresspiegelanstiegs. Es erhebt sich nun aber die Frage, welche physikalischen Prozesse den Rückgang der Verdunstung in der gesamten untersuchten Region über mehr als 30 Jahre verursacht haben.

Die Intensität der Wechselwirkung zwischen Land- oder Wasseroberflächen und der Atmosphäre wird durch Größen gesteuert, die den Austausch von Wärme, Feuchte und Impuls bewirken. Ein sehr wichtiger Bestandteil dieser Wechselwirkungen ist der Übergang von Wasser in flüssiger Form in die gasförmige Phase. Das ist der Prozess der Verdunstung. Um die Ursachen für die Trends der Meeresverdunstung zu ergründen, ist es erforderlich, auch die Zeitreihen der Größen auf die Veränderungen hin zu untersuchen, die für den Austausch zwischen Meer und Atmosphäre entscheidend sind, nämlich die Lufttemperatur, die Oberflächenwassertemperatur, die absolute Luftfeuchtigkeit sowie die Windgeschwindigkeit und -richtung in Oberflächennähe. Eine solche Untersuchung wurde für den Zeitraum 1961–1990 für Küsten- und Inselstationen sowie für Stationen im Einzugsgebiet des Kaspischen Meeres durchgeführt. Weder für die Luft- und Wassertemperaturen noch für die Luftfeuchtigkeit wurden statistisch signifikante lineare Trends festgestellt. Die in diesen Zeitreihen enthaltenen Änderungen können eher durch autoregressive Modelle 1. Ordnung beschrieben werden (wobei die Mittelwerte der Regressionsparameter 0,3–0,4 für die Lufttemperatur, 0,4–0,5 für die Wassertemperatur und 0,25–0,35 für die absolute Luftfeuchtigkeit betragen). In diesen Fällen ist die Vorhersagbarkeit der Schwankungen in den genannten Größen im Untersuchungsgebiet ziemlich gering (in der Regel nicht mehr als das ein- bis zweifache des jeweiligen Mittelungszeitraums).

Aber es wurden statistisch signifikante Trends (auf dem 99%-Niveau) in den Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die meisten Küsten- und Inselstationen sowie für die Stationen im Einzugsgebiet des Kaspischen Meeres gefunden. Dabei handelt es sich um eine allgemeine Tendenz zur Abnahme der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet während der Zeit 1961–1990. Der mittlere Trend ist etwa -0,3 bis -0,4 m/s pro Jahrzehnt oder 10% des Jahresmittelwertes. Die Korrelationsanalyse der langen Reihen der Verdunstung und der Windgeschwindigkeit ergab Aufschlüsse zu den Fragen nach Ursache und Wirkung. Vor 1972 waren positive Anomalien der Verdunstungswerte in Bezug auf den Gesamtmittelwert charakteristisch, ab 1972 haben dagegen negative Anomalien

das Bild bestimmt. Es zeigte sich, dass die Anomalien dieser Größe den mit entgegengesetztem Vorzeichen auftretenden Anomalien der Windgeschwindigkeit mit einer Zeitverzögerung von 2–3 Jahren folgen.

### Grundzüge der Umstellung der atmosphärischen Zirkulation in Bodennähe in der Region des Kaspischen Meeres

Es soll nun gezeigt werden, wie die zeitliche Variabilität der lokalen und regionalen hydrologischen und meteorologischen Verhältnisse mit den großräumigen Klimaschwankungen zusammenhängen. Zunächst werden die Gleichungen für den Wasserhaushalt des Meeres allein (1) und für die Atmosphäre über dem Gesamtgebiet (2) formuliert (RASMUSSEN 1977):

$$dH/dt = A_F + A_G + N_{AM} - V_{AM} \quad (1)$$

$$dW/dt + T_1 - T_2 \approx N - V \quad (2)$$

H: Füllungsgrad des Meeres

(entspricht dem räumlich gemittelten Wasserstand)

$A_F$ : Wasserzufuhr durch Flüsse

$A_G$ : Wasserzufuhr durch Grundwasser

N: Niederschlag

V: Verdunstung

W: Feuchtegehalt der Atmosphäre über dem Gesamtgebiet

$T_1$ : horizontaler Feuchtetransport in das Gebiet

$T_2$ : horizontaler Feuchtetransport aus dem Gebiet heraus

t: Zeit

Index<sub>AM</sub>: abgeschlossenes Meer

Index<sub>E</sub>: Einzugsgebiet

Es soll angenommen werden, dass im Fall des Kaspischen Meeres  $A_G = 0,01A_F$  gilt und dass die Flusswasserzufuhr  $A_F$  hauptsächlich durch die Differenz Niederschlag – Verdunstung im Einzugsgebiet in der Form  $A_F = f(N_E - V_E)$  bestimmt wird. Unter diesen Voraussetzungen folgt

$$dH/dt \approx f(N_E - V_E) + N_{AM} - V_{AM} \approx N_{AM} + N_E - V_{AM} - V_E \approx N - V \quad (3)$$

Aus den Gleichungen (2) und (3) ergibt sich für die Wasserstandsänderungen

$$dH/dt \approx dW/dt + T_1 - T_2 \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) folgt speziell, dass die Wasserstandsschwankungen wesentlich von den horizontalen Feuchtetransporten durch die Luftmassen einschließlich der Richtung dieser Transporte abhängen. Der so



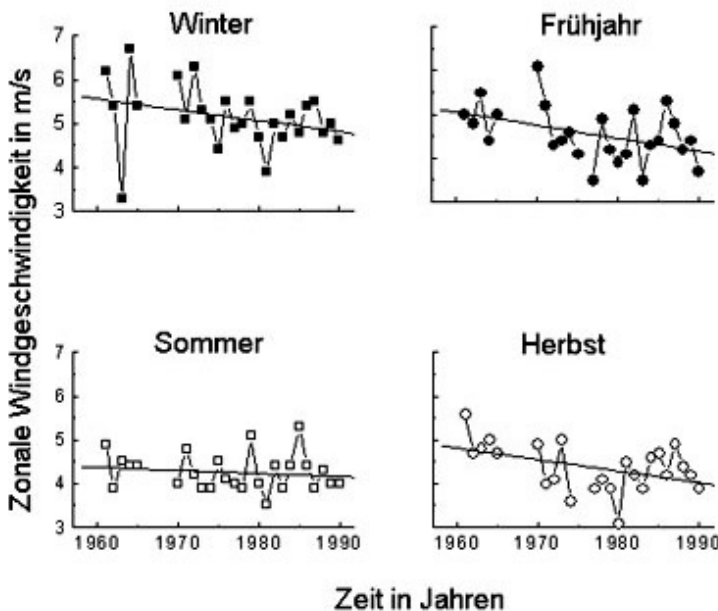
gefundene Zusammenhang ergibt zusammen mit dem nachgewiesenen Trend der Windgeschwindigkeit die Grundlage, um die Möglichkeit der Existenz von bestimmten Trends dieser Größe und von Windrichtungsänderungen in der Umgebung des Kaspischen Meeres abzuschätzen. Auf die Klärung der Ursachen der Niederschlags-, Verdunstungs- und Wasserstandsschwankungen konzentrieren sich die neueren Forschungen. Hier sollen die linearen Trends und die Frage nach ihrer statistischen Signifikanz an Zeitreihen für die Stationen Bektasch, Kara Bogaz Gol, Kuuli-Mayak, Insel Ogurchinskii und Gasan-Kuli untersucht werden.

Die räumliche Anordnung von repräsentativen Windmessstationen erlaubt, Monatsmittelwerte für 16 Richtungsbereiche im Abstand von  $22,5^\circ$  zu analysieren. Für jeden Richtungsbereich und für jeden Monat wurden der lineare Trend und seine statistische Signifikanz, der Jahresmittelwert, die mittlere quadratische Streuung, die mittlere Häufigkeit und der Trend der Häufigkeit berechnet (siehe *Abb. 3.1.12-2*).

Für Westwinde beträgt der Jahresmittelwert des Trends  $-0,23$  m/s pro Jahrzehnt, für Ostwinde  $-0,38$  m/s pro Jahrzehnt. Für die Winde aus meridionalen Richtungen (um Nord und Süd) existieren keine signifikanten linearen Trends. Die Befunde erlauben die Feststellung, dass die Klimaänderung im Einzugsgebiet des Kaspischen Meeres in den letzten Jahrzehnten nicht

mit der Änderung der Temperaturverhältnisse verbunden war, sondern vielmehr in einer Änderung der atmosphärischen Zirkulation zum Ausdruck kam. Eine solche Änderung der Dynamik der Atmosphäre ist der Grund für die Bildung und Entwicklung der beobachteten rezenten Richtungsschwankungen in der Bewegung und Intensität der Luftmassen. Diese Tendenz hat sich als beständig erwiesen, so dass statistisch signifikante lineare, negative Trends in den Messreihen der Windgeschwindigkeit festgestellt werden konnten.

Der langzeitliche mittlere Verlauf von Größen wie Luft- und Wassertemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit, die die Intensität der Wechselwirkung zwischen Meer und Atmosphäre charakterisieren, wurden ebenfalls untersucht (PANIN 1999, PANIN & DZUYBA 2003). Der mittlere jährliche Gang der Verdunstung des Kaspischen Meeres ist demnach unterschiedlich. In den südlichen und mittleren Teilen des Meeres ist die Verdunstung am intensivsten im Winter und zwar mit etwa 80 mm/Monat, während es 100 mm/Monat an der östlichen Küste sind, wo die hier untersuchten Stationen liegen. Die minimale Verdunstungsrate wird dort im späten Frühjahr bzw. frühen Sommer mit 30 mm/Monat beobachtet. Im Herbst wächst der Betrag wieder an. Die jährliche Differenz der Monatswerte von diesem Seegebiet beträgt im Mittel 90 mm/Monat oder etwa 10% des Jahreswertes.



**Abb. 3.1.12-2:** Windgeschwindigkeitsänderungen in m/s an der Station Bektasch, 1960–1990, bei zonaler Windrichtung. Die Geraden repräsentieren die linearen Trends (nach PANIN & DZUYBA 2003).

Die Analyse der Variationen der Bodenwindgeschwindigkeit bei verschiedenen Richtungen zeigt in der betrachteten Zeit für die meisten Stationen, dass die statistisch signifikanten Trends der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit sich infolge der entsprechenden Trends der Geschwindigkeit bei Winden mit zonalen Richtungen (deren Geschwindigkeit ist die höchste) in den Jahreszeiten entwickeln, in denen bemerkenswert hohe Verdunstungsraten beobachtet werden (Winter, Herbst). An Stationen ohne statistisch signifikante Trends der Jahreswerte existieren jedoch negative Trends im Winter (hauptsächlich bei zonalen Richtungen). Es ist verständlich, dass die negativen Zonalwindtrends im Herbst und Winter in erster Linie die Abnahme der Verdunstungswerte in den letzten 30–40 Jahren bewirkt haben.

Es kann somit festgestellt werden, dass sich die globale Veränderlichkeit des Klimas sogar in der Region des Kaspischen Meeres bemerkbar macht, und zwar in einer markanten Umstellung der bodennahen atmosphärischen Zirkulation in den letzten Jahrzehnten. Denn in dieser Region wird insgesamt eine Tendenz zur Abnahme der Bodenwindgeschwindigkeit beobachtet. Vor diesem Hintergrund variieren Trends in den mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten nach Richtung und Jahreszeit. Beständige, statistisch signifikante Trends der Geschwindigkeiten sind für die Zonalwinde (aus West bzw. aus Ost) gefunden worden. Der Trend ist am besten im Winter (bis zu  $-0,9$  m/s pro Jahrzehnt für die Westwinde und  $-0,5$  m/s für die Ostwinde) und im Sommer bis zu  $-0,3$  m/s für die West- und Ostwinde ausgeprägt.

Trends der Windstärke bei meridionalen Richtungen haben, speziell im Frühjahr und Sommer, unterschiedliche Vorzeichen; einige der Trends sind statistisch nicht signifikant. Es wurde auch festgestellt, dass an den Stationen, wo zuvor keine statistisch signifikanten Trends der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit ermittelt wurden, ein Trend nur bei den zonalen Windrichtungen existiert.

Diese Ergebnisse zeigen, dass im Untersuchungsgebiet eine stetige, statistisch gesicherte Abnahme der Bodenwindgeschwindigkeiten zonaler Windrichtungen zu beobachten ist, bei denen die Geschwindigkeit etwa 20% höher liegt als die Geschwindigkeiten beim Auftreten anderer Richtungen. Dieser Trend wird hauptsächlich im Herbst und Winter beobachtet, wenn die Intensität der Wechselwirkung zwischen Meer und Atmosphäre maximal ist. Die Veränderung der atmosphärischen Dynamik in der Zone der Wechselwirkung ist die physikalische Grundlage für die Herausbildung der gegenwärtigen Tendenzen im Wasserstand des Kaspischen Meeres. Damit ist klar, dass die deterministi-

sche Herangehensweise lohnenswert für die Diagnose sowohl der gegenwärtigen Variationen der bedeutendsten Verlustgröße der Wasserbilanz des Kaspischen Meeres als auch für die Prozesse ist, die in hohem Grad den Wasserzustrom in das Meer (nämlich Verdunstung und Niederschlag im Einzugsgebiet) kontrollieren.

ARPE et al. (1999) konnten unter Nutzung des globalen Ozean-Atmosphäre-Klimamodells ECHAM4-OPYC3 (Max-Planck-Institut für Meteorologie bzw. Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg) eine enge Korrelation zwischen im Modell berechneten Größen und den Wasserbilanzkomponenten des Kaspischen Meeres ermitteln. Damit werden auch Vorhersagen (unter den spezifischen Bedingungen des Modells und seiner Eingangsgrößen) der Prozesse möglich. Gezeigt wird hier die auf diese Weise berechnete Niederschlagsreihe bis zum Jahr 2100 (vgl. *Abb. 3.1.12-3*). Die jüngsten Daten der Wasserstandsschwankungen des Kaspischen Meeres bestätigen die Tendenz der Vorhersage.

### Schlussfolgerung

Selbst wenn die klimarelevanten Prozesse wie beispielsweise die Schwankungen der Solarstrahlung oder die Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre genau bekannt sind, müssen die Auswirkungen solcher Schwankungen auf das Klima nicht nur im globalen, sondern auch im regionalen und lokalen Maßstab genau untersucht werden. Dabei muss beachtet werden, dass das Klimasystem der Erde geringe Änderungen der Antriebsprozesse entweder verstärken (positive Rückkopplung) oder dämpfen kann (negative Rückkopplung). Im vorliegenden Fall ging es um die Feststellung des Einflusses des variablen Klimas auf die Wasserstandsentwicklung des Kaspischen Meeres. Das kann über die Analyse der ebenfalls klimaabhängigen Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten dieses Meeres erfolgen.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wirkten sich die großräumigen Klimaänderungen auf das Kaspische Meer und sein Einzugsgebiet in Form einer Umstellung der bodennahen atmosphärischen Zirkulation aus. Das konnte anhand der statistisch gesicherten Abnahme der Windgeschwindigkeit bei Auftreten zonaler Richtungen, insbesondere im Herbst und Winter, nachgewiesen werden. Diese Winde sind zugleich die häufigsten und stärksten in der Region. Mit diesen Änderungen der Windverhältnisse ist ein statistisch signifikanter negativer Trend der Verdunstung im Untersuchungsgebiet verbunden. Das zieht Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten in der Weise nach sich, dass der mittlere Wasserstand des Kaspischen Meeres seit Ende der 1970er Jahre wieder stark angestiegen ist.



**Abb. 3.1.12-3:** Der Niederschlag im Einzugsgebiet des Kaspischen Meeres im 20. und 21. Jahrhundert auf der Grundlage von Klimamodellrechnungen (Dreiecke). Zum Vergleich sind auch Messwerte (Kreise) eingezeichnet (nach ARPE et al. 1999)

## Literatur

- ARPE K., L. BENGTSSON, G. S. GOLITSYN, I. I. MOKHOV, V. A. SEMENOV, P. & V. SPORISHEV (1999): Analysis and Simulation of Changes in the Hydrological Regime in the Caspian Sea Basin. Dokl. Ross. Akad. Nauk, 366, 2, 248-252.
- BUDYKO M.I., N. A. EFIMOVA & V. V. LOBANOV (1988): Future Level of the Caspian Sea. Meteorol. i Gidrol., Nr. 5, 86-94.
- GOLITSYN G.S. & G. N. PANIN (1989): On Water Balance and the Present Variations in the Caspian Sea Level. Meteorol. i Gidrol., 1989, N. 1, 57-64.
- GOLITSYN G.S., D. Ya. RATKOVICH, M. I. FORTUS & A. V. FROLOV (1998): On the Present Rise in the Caspian Sea Level. Vodnye Resursy, 25, 2, 133-145.
- PANIN G.N (2005): Wasserstandsschwankungen des Kaspischen Meeres als Folge regionaler Klimaschwankungen. In: Lozán, J.L., H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, Chr.-D. Schönwiese (Hrsg.) - Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? GEO-Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg. 212-215.
- PANIN G.N (1999): Progress in Studying Evaporation from the Caspian Sea Surface. Vodnye Resursy, 26, 6, 643-651.
- PANIN G.N., DZUYBA A.V. & A. G. OSIPOV (1991): On Possible Causes of Changes in the Evaporation in the Caspian Sea Region during Past Decades. Vodnye Resursy, 18, 3, 5-16.
- PANIN G.N. & DZUYBA A.V. (2003): Modern changes of a wind vector and intensity of evaporation from a surface of the Caspian Sea. Vodnye Resursy, 30, 2, 198-207.
- RATKOVICH D.Y. (1994): Probabilistic Prediction of the Level Regime in Inland Water Bodies. Vody sushi: problemy i resheniya (Continental Waters: Problems and Solutions), Moscow: Inst. Water Problems of Russ. Acad. Sci., Moscow: 145-178.
- RASMUSSEN E.M. (1977): Hydrological Applications of Atmospheric Vapor Flux Analysis. Geneva:WMO, Rep. 1.

*Dr. Gennady N. Panin*  
*Institute of Water Problems*  
*RAS, 117333 Moscow, Russia,*  
*panin@aqu.laser.ru*